

文章编号: 1000-7598 (2011)增刊 1-0520-06

土工结构地震滑动位移统计分析

杜文琪, 王 刚

(香港科技大学 土木及环境工程学系, 香港 九龙)

摘 要: 土工结构在地震荷载下的滑动位移是评估结构安全性能的重要参数。采用一种新型的地震波选择方法, 在强震数据库中修改地震波, 以有效地在结构动力分析中引入不同特征地震波的影响。通过一个简单的土工结构地震滑移模型, 系统地分析了结构基本周期和滑动面屈服系数对地震滑移概率及相应滑移距离的影响, 并提出了滑动体在不同地震场景和基本周期条件下的滑移概率和累积滑动位移的统计模型, 对基于性能的土工结构抗震设计具有重要的参考意义。

关 键 词: 地震波选择; 地震场景; 土工结构; 地震滑移

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Statistical analysis of earthquake-induced sliding displacements of earth structures

DU Wen-qi, WANG Gang

(Department of Civil and Environmental Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Kowloon, Hong Kong SAR, China)

Abstract: Earthquake-induced sliding displacement is an important parameter for seismic design of earth structures. Using a novel ground motion selection method, we select and modify ground motions from a strong motion database to capture the median, standard deviation and correlations of response spectra of an earthquake scenario, making it an effective method to incorporate ground motion variability into dynamic time-history analysis of earth structures. Using the selected ground motions and a simple analytical model, the statistical properties of permanent sliding-displacement of earth structures were studied under various earthquake scenarios. The study revealed the influence of structural periods and yielding coefficients of the sliding interface on the statistical distributions of the earthquake-induced sliding displacements. Finally, a model is proposed for the sliding probability and sliding displacements of earth structures conditioned on various earthquake magnitude and rupture scenarios and different fundamental periods. It is demonstrated that the ground motion selection method can effectively represent ground motion variability of different earthquake scenarios. The results have important implications in performance-based earthquake design of earth structures.

Key words: ground motion selection; earthquake scenario; earth structures; earthquake-induced sliding displacement

1 引 言

我国幅员辽阔, 处于世界上两个最大的地震带之间, 地震灾害频繁。例如, 山东省王屋、冶源、黄山等土坝, 北京密云白河土坝, 唐山陡河土坝, 辽宁石门土坝等, 都因地震作用而发生滑坡、震陷、裂缝等灾害^[1]。因此, 准确预测土工结构在地震作用下的永久位移, 对重大土工结构的安全设计具有重要意义。

近年来, 结构动力反应分析越来越普遍地应用在土木结构的抗震设计中。然而, 由于观测历史和

观测设备的限制, 符合设计标准的强震记录非常稀少。因此, 有必要对现有的地震波观测记录进行选择 and 修改, 以代表各种地震场景。另外, 地震波的传播受震源、传播路径和场地条件等因素的影响, 在时域和频域上表现出不同特性。如何在地震分析中考虑不同特征的地震波的影响, 是地震分析的难点、热点课题。

本文利用一种新型的地震波选择方法, 选择代表各种地震场景的地震波组。应用该方法, 对土工结构在地震荷载下的滑动位移进行了系统的分析。本文提出了在土工结构在各种地震场景下的地震滑

收稿日期: 2011-01-17

基金项目: 香港大学教育资助委员会基金 (No. DAG08/09.EG13,DAG11EG03G); 李氏基金会杰出成就基金。

第一作者简介: 杜文琪, 男, 1985 年生, 博士研究生, 主要从事地震岩土工程方面的研究工作。E-mail: dwq@ust.hk

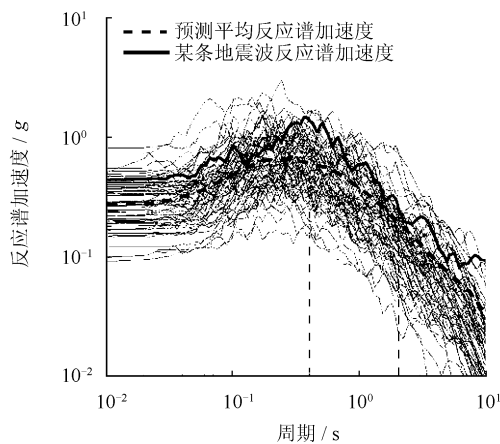
通讯作者: 王刚, 男, 1974 年生, 博士, 助理教授, 主要从事地震岩土工程方面的研究工作。E-mail: gwang@ust.hk

移概率和滑动位移的统计模型，对工程设计具有重要的参考意义。

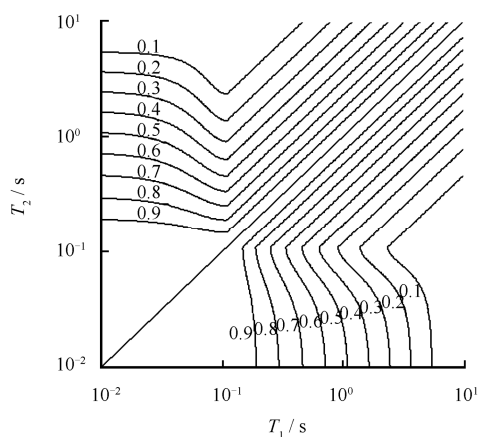
2 新型地震波选择方法

2.1 地震反应谱特性

地震波是个复杂的时序过程。工程设计中经常用反应谱来描述地震波的特性。通过大量强震观测数据统计分析表明，在特定地震场景和地质条件参数（如震级、断层类型、断层距离、场地状况等）下，地震加速度反应谱值在各个谱周期上可以近似为自然对数分布。图 1(a)给出了断层距离为 10 km 的 7 级地震的反应谱分布。需要指出的是，平均反应谱并不代表任何实际发生的地震。实际地震反应谱的形状，如图所示，在各个谱周期上有变化性，反映了地震波在频域上的特性。



(a) 地震波反应谱加速度分布



(b) 不同周期之间地震波谱反应加速度的相关系数

图 1 地震波谱反应加速度分布及相关系数

Fig.1 Response spectrum distribution and correlation

近期研究进一步表明，不同谱周期的反应谱加速度之间存在着内在的相关性^[2]，是描述不同特征地震波的重要方面。图 1(b)给出了不同谱周期的反

应谱加速度之间的经验相关系数。一般来说，反应谱加速度相近的周期之间存在较大的相关系数；反之，相关系数越小。

2.2 地震波的选择

最近，Wang^[3]提出了一种快速、高效的地震波选择方法。该方法对现有的地震波记录进行适当的选择和修改，使之能代表特定的地震场景。该方法保证了所选择的地震波反应谱加速度在不同周期上的均值、方差，以及不同周期之间的相关系数符合经验预测公式。

2.2.1 构造符合地震场景的目标反应谱集合

运用多变量随机生成算法，可以生成一组（ n 个）符合经验预测平均值以及不同周期间协方差的目标反应谱加速度：

$$\ln S_a^{\text{target}} = N \left(\mu_{\ln S_a}, \Sigma_{\ln S_a} \right) \quad (1)$$

式中： $\ln S_a^{\text{target}}$ 为目标反应谱加速度的集合； N 为多维自然对数正态分布随机生成函数； $\mu_{\ln S_a}$ 为给定条件下的反应谱加速度均值矩阵； $\Sigma_{\ln S_a}$ 为反应谱加速度的协方差矩阵。对给定地震场景，这些变量可由地震衰减模型^[4]和反应谱相关系数模型^[2]得到。

2.2.2 确定搜索地震记录的限制条件和准则

地震波选择最基本的准则是所选地震波反应谱的形状应与同目标反应谱在设定的周期范围内相匹配。除了加速度反应谱的形状之外，其他一些重要的地震参数，如地震持续时间、强震动次数、有无强速度脉冲等等对工程结构的地震反应有重要的影响。因此，需要设定地震震级、断层距离、地震加速度放大系数等搜索参数的范围。

2.2.3 选择与目标反应谱相匹配的地震记录

为了使地震记录反应谱最接近于目标反应谱，需要对现有的地震时程进行适当的修改。由于修改后的地震波需尽量保持原有的特性，特别是频谱特性，因此仅对地震波幅值进行比例放大或者缩小，并用均方差 MSE 来量度地震记录的反应谱与目标反应谱的“匹配”程度。

对每一个目标反应谱，在搜索数据库中选择与之最佳匹配的地震波及其相应的比例系数。通过一系列的优化算法选出 n 条地震波，它们各自的反应谱最接近于各目标反应谱。该方法的简易流程可参见图 2。

本文采用的地震波数据库是基于美国太平洋地震中心 PEER-NGA 研究项目的新一代强震数据库 (<http://peer.berkeley.edu/nga/>)。该数据库共包含 173 次地震，涉及 1 456 个地震台，共 3 551 套 3 个

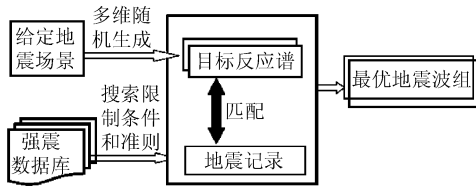


图2 地震波选择流程图

Fig.2 Flow chart of ground motion selection

方向的地震波加速度-时程。经过进一步详细的鉴别整理,只保留浅层活动地块地和自由场的地震记录,总计 3 182 套三向地震记录。具体选择、整理地震波的方法和准则,请参阅文献[3]。

3 土工结构地震滑移模型

1965年Newmark^[5]提出用刚体滑块模型近似计算土工结构在地震荷载下的永久滑移量。该模型假定当水平向地震加速度超过某屈服地震加速度值时,刚体将沿潜在滑动面产生相对滑动。滑体的地震永久滑移量为滑体与地基相对速度的时域积分。

Newmark 模型简单,至今仍被广泛应用。但它的刚体滑动体假定忽略了滑动体本身的动力学特性对地震永久位移的影响。Makdisi 等^[6]对 Newmark 模型进行了改进,他们采用非耦合方法把分析过程分解为两部分:首先假定没有土石坝地震滑移,采用等效线性法对土坝进行地震动力分析,以确定作用在潜在滑动体上的地震反应加速度历程;然后将此地震反应加速度历程与屈服地震加速度比较,按照 Newmark 积分法得到潜在滑动体的永久滑移量。非耦合模型往往得出较大的滑移量,可作为设计的上限解^[7]。

耦合模型同步求解土工结构自身的动力反应以及结构和与地基之间的相对滑移,结果更精确合理。利用完全非线性材料的耦合模型,Bray 等^[8]用 41 个地震中的 688 个地震记录对滑动体的动力反应进行了回归分析,得出了有用的经验预测方程。

本文采用 Rathje 等^[9]提出的简单耦合模型,采用解析法求解滑动体的动力平衡方程。使用如图 3 所示的随体坐标系,假定土工结构自身振动变形主要由第 1 阶主振型决定,滑动体相对该坐标系的位移可以分解为

$$u(y,t) = \phi_1(y)Y_1(t) \quad (2)$$

式中: $\phi_1(y)$ 为第一主振型; y 为纵向坐标; $Y_1(t)$ 为模态坐标。第一主振型 $\phi_1(y)$ 可表示为

$$\phi_1(y) = \cos(\pi y / 2H) \quad (3)$$

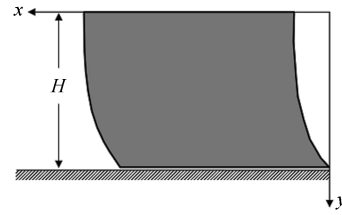


图3 滑移块体模型

Fig.3 Sliding block model

式中: H 为滑动体的总高度。

若滑动体和基础交界面不产生相对滑动,滑动体的动力方程可以等效为广义单自由度体系^[10]:

$$\ddot{Y}_1 + 2\lambda\omega_1\dot{Y}_1 + \omega_1^2 Y_1^2 = -L_1 / M_1 \ddot{u}_g \quad (4)$$

式中: $\ddot{u}_g(t)$ 为地震加速度; λ 为材料的阻尼比; L_1 、 M_1 和 ω_1 分别为

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= \int_0^H m(y)\phi_1(y)dy \\ M_1 &= \int_0^H m(y)[\phi_1(y)]^2 dy \\ \omega_1 &= \pi V_s / 2H = 2\pi / T_s \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: 滑动体沿 y 方向的质量分布函数为 $m(y)$; M_1 为考虑质量分布的广义质量; L_1 为地震加速度 $\ddot{u}_g(t)$ 按振型分布项; ω_1 为滑动体固有频率; V_s 为材料的剪切波速,它和滑动体基本振动周期的关系为 $T_s = 4H / V_s$ 。

当作用在滑动体上的力超过滑动体和基础交界面上的抗剪强度时,块体产生滑动。滑动条件为

$$-M\ddot{u}_g - L_1\ddot{Y}_1 = \mu Mg \quad (6)$$

式中: M 为滑动体总质量; $-M\ddot{u}_g$ 为地面加速度产生的作用力; $L_1\ddot{Y}_1$ 为滑动体自振产生的作用力; μ 为交界面摩擦系数。

当滑动体和地基产生相对滑移,结构和基础滑移面上的平衡方程为

$$-M(\ddot{u}_g + \ddot{s}) - L_1\ddot{Y}_1 = \mu Mg \quad (7)$$

式中: \ddot{s} 为相对滑移加速度,可以表示为

$$\ddot{s} = -\mu g - (L_1 / M)\ddot{Y}_1 - \ddot{u}_g \quad (8)$$

把上述解代入滑动条件下的土工结构的动力方程:

$$\ddot{Y}_1 + 2\lambda\omega_1\dot{Y}_1 + \omega_1^2 Y_1^2 = -\frac{L_1}{M_1}(\ddot{u}_g + \ddot{s}) \quad (9)$$

可以得出关于 Y_1 的微分方程:

$$\ddot{Y}_1 + \frac{2\lambda\omega_1}{d_1}\dot{Y}_1 + \frac{\omega_1^2}{d_1}Y_1^2 = \frac{\mu L_1 g}{d_1 M_1} \quad (10)$$

式中: $d_1 = 1 - L_1^2 / (MM_1)$ 。该微分方程可以通过经

典数值方法求解。至此，我们求解出滑动体在地震荷载作用下的自身振动，以及沿滑动面的相对滑移。当滑移速度 s 变为 0 时，滑动停止，控制方程为公式 (4)。

4 土工结构地震滑移统计分析

本章节利用上述的新型地震波选择方法和简单耦合模型对土工结构的地震滑移进行统计分析。设定地震及地质条件为：震级 $M_w=7$ ，距断层距离 $R_{rup}=10$ km，软岩场地，地下 30 m 平均剪切波速为 $V_{s30}=760$ m/s。设定地震数据的搜索范围为： $M_w=6\sim 8$ ， $R_{rup}=0\sim 30$ km。独立选择出代表该地震场景的 4 组地震波，数量分别为 30、60、100、200 个地震记录，用来对比结果的一致性。图 4 显示了 100 条地震波组的反应谱加速度的分布情况。对地震波的反应谱分布和有效持时等其他特性进一步检验，证明所选地震记录可以有效地代表该选定的地震场景的统计特性。更详细的讨论，请参阅文献[3]。

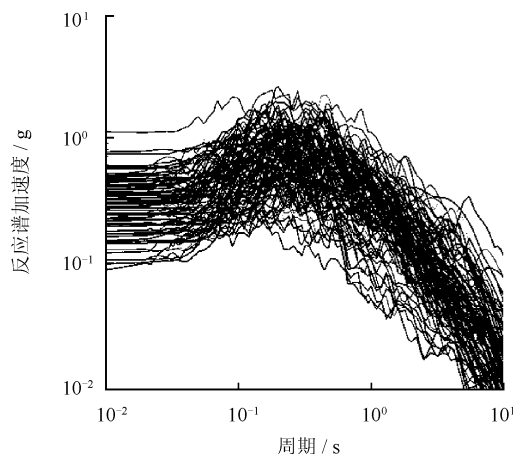


图 4 反应谱加速度分布 (100 条地震波组)
Fig.4 Distribution of response spectrum (100 record group)

以下示例假设土工结构滑动面的屈服系数等于滑动面摩擦系数 $K_y = \mu = 0.1$ ，系统的阻尼比 $\lambda = 0.05$ ，土坝的固有周期 T_s 在 0.01~10 s 范围内变化。根据 Bray 等^[8]建议，如果滑动体累积滑移位移小于 1 cm，在工程上可以忽略不计。本文把累积滑移位移小于 1 cm 的数据统称为“零”滑移距离。

4.1 滑动概率

将选出的 4 组地震波作为输入参数，进行地震滑移耦合分析。在该地震场景下的“零”滑动（滑移距离小于 1 cm）概率可以用经验统计法得出：

$$P_{s=0} = \text{“零”滑移地震数量} / \text{总地震数量} \quad (11)$$

相应地，滑动体的滑移概率为

$$P_{sliding} = 1 - P_{s=0} \quad (12)$$

图 5 显示了结构基本周期和屈服系数（即滑动面摩擦系数）对“零”滑动概率具有重要的影响。若屈服系数 $K_y=0.1$ ，当结构接近刚性体（周期趋近于 0 秒）时，“零”滑动概率约为 40%。当结构周期为 0.2~0.4 s 时，结构周期接近地震荷载的主周期从而产生共振。与刚性体相比，结构共振增加了滑体的滑移概率，“零”滑动概率在此周期范围内达到最小值（约 10%）。随着结构周期进一步增加，结构的基本周期远离地震荷载主周期范围，“零”滑动概率增加。值得进一步指出的是，经验统计法的精度取决于统计样本的大小。而 4 组地震的样本数量从 30~200 个，均给出比较一致的结果。另外，同一周期土坝的滑移概率受滑动面屈服系数 K_y 的影响很大。当结构接近刚性体时，随着 K_y 从 0.1 增加到 0.3，“零”滑移概率从 40%变为接近 90%，说明增加滑动面摩擦系数可以有效增加结构抗滑动能力。3 组不同屈服系数情况下的“零”滑动概率均在固有周期 0.2~0.4 s 范围内达到最小值，显示了与地震主周期产生共振的土坝具有最大的滑移概率。

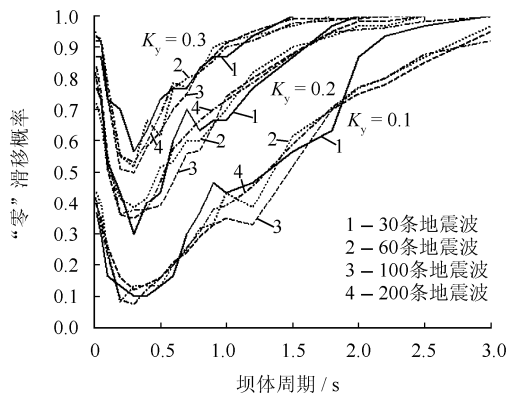


图 5 结构周期和屈服系数对应的“零”滑移概率
Fig.5 “Zero”sliding probability for different periods and yielding coefficients

4.2 滑动位移

对大于 1 cm 的累计滑移进行进一步统计结果表明，在滑动条件下，不同基本周期的土工结构累计滑移的分布函数曲线十分接近对数正态分布。对比不同地震波样本数量的结果可以发现，它们均分布在 $\pm 10\%$ K-S (Kolmogorov-Smirnov) 边界线内。当然，地震波样本数量越多，结果越接近理论分布曲线。图 6 显示了结构基本周期 $T_s = 1.0$ s 的累计滑移的累积分布函数曲线。此结果验证了可以用对数正态分布函数对滑动条件下的地震滑移位移进行统

计分析。

图7总结了累计滑移距离对数正态分布的中值以及方差随结构周期的变化。如图所示,在滑动情况下,滑动位移的中值随结构基本周期的增大而从5 cm增加到10 cm。在此地震场景下,结构基本周期对滑动位移的方差没有太大的影响。

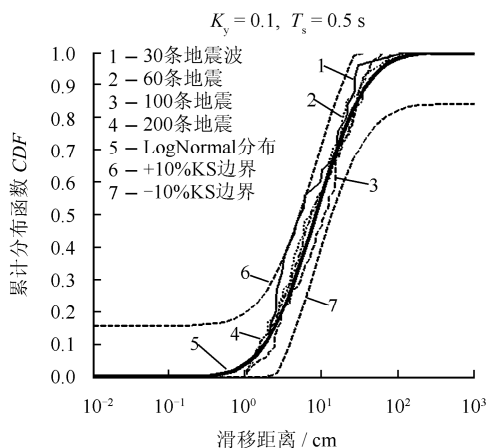


图6 不同周期土坝滑移距离的累计分布函数
Fig.6 Cumulative distribution of sliding displacements

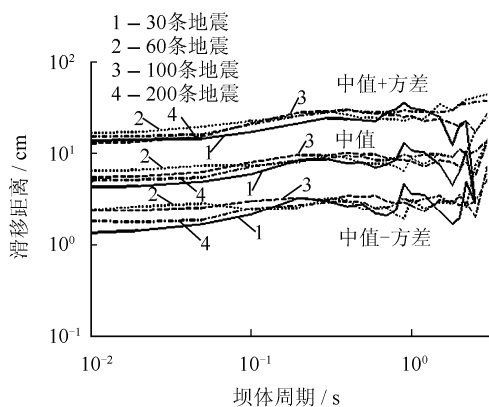


图7 滑移距离中值及其方差
Fig.7 Median and standard deviation of sliding displacements

以上结果均表明,采用新型地震波选取方法,地震波的数量对结果没有显著的影响。因此推荐使用较少数量的地震波组(60条)以有效地代表地震场景的变化性,同时能提高计算效率。

4.3 地震滑移反应曲面

把上述分析推广到多种不同地震场景,可以构造出地震滑移的反应曲面。在给定地震场景(M_w , R_{rup})和结构周期(T_s)条件下,土工结构地震滑动位移超过 x 的总概率为

$$P(\text{disp} > x | M_w, R_{rup}, T_s) = [1 - P_{s=0}(M_w, R_{rup}, T_s)] [1 - F(x | M_w, R_{rup}, T_s)] \quad (13)$$

式中: $P_{s=0}$ 为“零”滑动反应面方程; F 为滑移距离的对数正态累计分布函数。

“零”滑动反应面方程为“零”滑移概率随震级、断层距离和滑动体基本周期的变化方程。选取6个震级(5.5、6.0、6.5、7.0、7.5、8.0)和7个断层距离(1、3、5、10、30、50、100 km),假设软岩场地,地下30 m平均剪切波速 $V_{s30} = 760$ m/s,滑动面屈服系数 $k_y = \mu = 0.1$,阻尼比 $\lambda = 0.05$,结构固有周期 T_s 的变化范围为 $0.01 \sim 10$ s。考虑到计算效率以及结果精度,用60条地震波来代表每个地震场景进行动力计算分析。通过以上42个地震场景分析,图8显示了结构固有周期分别为 T_s 分别为0.01、0.5、1、2 s时的“零”滑移概率分布。图中可以看出,土工结构在远场小地震(左上角)下的“零”滑移概率接近1。随着震级的提高,断层距离的减小,“零”滑移概率越来越小,直到近场大地震(右下角)下的“零”概率为0(即全部滑动)。同时,“零”滑移概率随震级和断层距离的变化规律与结构基本周期 T_s 有密切关联。

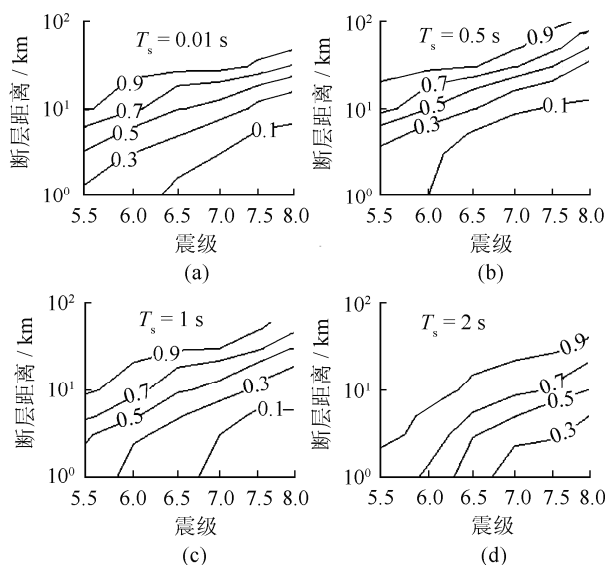


图8 “零”滑移概率与震级、距离变化图
Fig.8 “Zero” sliding probability under different magnitudes and distances

在给定震级($M_w = 7$)条件下,滑动体“零”滑移概率与结构基本周期和断层距离的变化关系由图9所示。如图所示,当滑动体周期为 $0.2 \sim 0.4$ s 之间时,结构周期与地震波主周期接近产生共振,从而显著加大其沿滑动面的滑移概率。此外,滑动概率随断层距离的增加迅速衰减。总体来看,断层距离小于30 km的近场地震区滑动概率大于20%。

图10给出了在同样的震级($M_w = 7$)条件下,

滑动距离（大于 1 cm 的数据）的中值与结构基本周期和断层距离的关系。当滑动体周期为 0.2~0.4 s，并且距断层距离小于 3 km 范围内，地震滑动位移的中值可达 25~40 cm。随断层距离增大，滑动位移的中值迅速衰减，到距断层 10 km 处约为 10 cm。

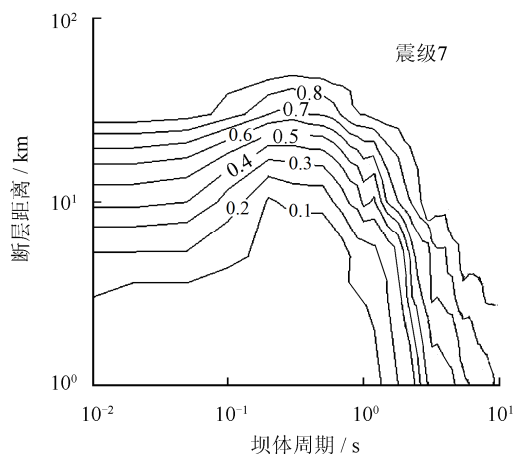


图 9 “零” 滑动概率与固有周期、距离变化图
Fig.9 “Zero” sliding probability vs. fundamental period and rupture distance

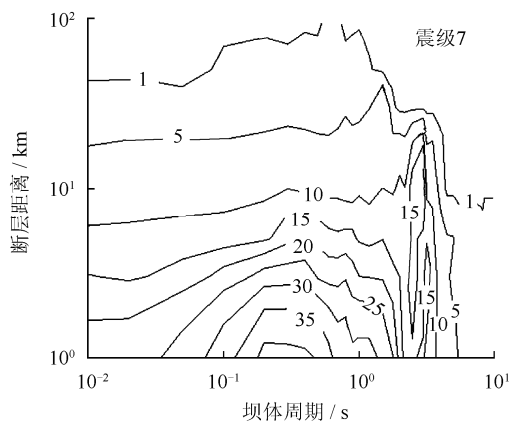


图 10 滑动距离中值与固有周期、距离变化图
Fig.10 Median sliding displacement vs. fundamental period and rupture distance

根据以上得出的“零”滑动反应面和滑动位移统计结果，可以由式（13）得到滑动体在给定地震场景和结构周期条件下的滑动位移统计特性。由于篇幅的限制，不再详细叙述。

5 结 语

本文采用了新型地震波选择方法，选取各个地震场景的地震波作为输入，对土工结构在地震荷载下的滑动位移进行了统计分析。研究表明：应用新型地震波选择方法选取地震记录，可以有效保持地震场景的特性。应用此方法，本文对土工结构

在各种地震场景下的滑动位移分布进行了统计分析，提出了滑动概率和滑动距离随地震震级、断层距离和结构周期变化的统计模型，对抗震工程设计有重要的参考意义。

参 考 文 献

- [1] 顾淦臣. 土石坝地震工程[M]. 南京：河海大学出版社,1989: 208—280.
- [2] BAKER J W, JAYARAM N. Correlation of spectral acceleration values from NGA ground motion models[J]. *Earthquake Spectra*, 2008, 24(1): 299—317.
- [3] WANG G. A ground motion selection and modification method capturing response spectrum characteristics and variability of scenario earthquakes[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, 31: 611—625.
- [4] ABRAHAMSON N A, AKINSON G, BOORE D, et al. Comparisons of the NGA ground-motion relations[J]. *Earthquake Spectra*, 2008, 24(1): 45—66.
- [5] NEWMARK N M. Effects of earthquakes on dams and embankments[J]. *Géotechnique*, 1965, 15(2): 139—160
- [6] MAKDISI F I, SEED H B. Simplified procedure for estimation dam and embankment earthquake induced deformation[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1978, 104(GT7): 849—868.
- [7] RATHJE E M, BRAY J D. Nonlinear coupled seismic analysis of earth structure[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, 126(11): 1002—1215.
- [8] BRAY J D, TRAVASAROU T. Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(4): 381—392.
- [9] RATHJE E M, BRAY J D. An examination of simplified earthquake induced displacement procedures for earth structures[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, 36(1): 72—87.
- [10] CHOPRA A K. Dynamics of Structures[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2001: 309.