

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.12.001

多维地震荷载等效循环周数计算模型

陈青生¹, 熊 浩², 高广运³

(1.新加坡国立大学 土木与环境工程学院, 新加坡 119077; 2.台州学院, 浙江 台州 318000;

3.同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 地震波是一种多维的随机荷载, 一般在参数测定中应将其转化为等效循环荷载。采用有限元模拟多向地震荷载作用下的砂土动力响应, 介绍了弹塑性界面模型及其参数的含义, 阐述了确定参数的方法, 选取涵盖大震、中震、近场、远场及不同土质条件的 155 组多向地震输入时程进行单向、多向加载。利用混合效应回归分析法, 建立了多向地震荷载作用下等效循环周数计算模型, 分析验证了该模型的准确性。提出了基于等效循环周数比的多维地震荷载作用下等效循环周数计算方法。研究表明: 模型预测值能较好地反映等效循环周数实际值的变化趋势; 震级和震中距对等效循环周数比影响不明显; 砂土特性对等效循环周数比的影响具有主导作用, 在不同震级范围内, 等效循环周数比均随着相对密度的增大而增大, 对应于相对密度为 45%、60%、80%、100% 的砂土, 等效循环周数比分别近似为 1.60、1.85、1.90 和 2.05。

关 键 词: 多维地震; 等效循环周数比; 计算模型

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2015) 12—3345—10

A computational model for equivalent cyclic number of multidirectional earthquake loading

CHEN Qing-Sheng¹, XIONG Hao², GAO Guang-Yun³

(1. Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore, Singapore City, 119077, Singapore;

2. Taizhou University, Taizhou, Zhejiang 318000, China;

3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: An earthquake wave is a multidirectional random load, which is commonly converted to an equivalent cyclic load with uniform amplitude for laboratory tests. Dynamic responses of sand subjected to multidirectional earthquake loading are simulated using a FEM code. An elastoplastic boundary surface constitutive model is introduced. The method for determining material parameters is discussed. 155 groups of ground motions with multi-components from far to near field of moderate or strong earthquake events at different site conditions are used as input motions for unidirectional and multidirectional loading. Based on hybrid-effect regression analysis methods, a computation model for equivalent number of uniform strain cycles under the condition of multidirectional earthquake loading is proposed. Capability of the proposed model is clearly shown. Based on the ratio of equivalent cyclic number of strain, a method for computing the equivalent cyclic number of multidirectional earthquake loading is proposed. The results show that the proposed model can well predict the variation trend of the equivalent cyclic number of uniform strain cycles. The ratio of the equivalent cyclic number is trivially affected by the earthquake magnitude and site-to-source distance, though it is significantly influenced by the properties of sand. The ratio of equivalent number of strain cycles increases with the relative density of sand within different scopes of earthquake magnitude. For the sands of relative densities 45%, 60%, 80% and 100%, the mean ratio is about 1.60, 1.85, 1.90 and 2.05, respectively.

Keywords: multidirectional earthquake loading; ratio of equivalent number of strain cycle; computation model

1 引 言

地震波是一种多维的随机荷载, 是十分复杂的

现象^[1-2]。它受震级、震源机制、传播途径、震中距、局部场地条件等众多因素的影响, 具有很强的随机性、不确定性和不规则性^[3]。在岩土工程的动力计

收稿日期: 2014-05-12

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (No. Y1110950); 国家自然科学基金项目 (No. 41372271); 上海市重点学科建设项目 (No. B308)。

Foundation item: Project supported by the National Natural Science Foundation of Zhejiang Province (Grant No. Y1110950), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41372271) and Key Scientific Construction Program of Shanghai (Grant No. B308).

第一作者简介: 陈青生, 男, 1982 年生, 博士, 主要从事岩土动力本构模型与岩土地震工程方面的研究工作。E-mail: chqsh2006@163.com

算分析中,如大坝和地基的抗液化分析、高边坡的动力稳定分析以及土体的动力特性参数测定中,通常需要将一个随机的振动荷载转化为等效循环荷载,其中,等效循环周数的确定是荷载等效过程的难点^[4]。

许多学者对等效循环周数计算展开了大量的研究。Seed 等^[5]根据线性累积损伤原理的处理方法计算评估土体液化势的等效循环周数,该方法使用方便,一直沿用至今;Annakj 等^[6]对等效循环周数问题做了比较系统的研究,指出等效就是在破坏意义上的等效;何广讷^[7]在研究随机波浪荷载作用下海底地基液化时,应用随机振动理论对等效循环荷载进行了研究,并提出了计算等效荷载的统一谐振公式;Liu 等^[8]对 150 次地震的 1 664 条地震记录的研究表明,等效循环周数与震级、震中距、场地条件等密切相关,同时给出相关计算公式。此外,Bommer^[9]、Stafford^[10]、袁晓铭^[11]等都等效循环周数相关问题展开过研究,并取得许多有价值的成果。

然而,上述研究都是基于一维线性累积损伤原理进行的等效循环周数计算分析,未考虑多向地震荷载作用的影响。Pyke 等^[12]提出简单地采用 2 倍单向地震荷载等效循环周数计算多维地震荷载的等效循环周数,但陈青生等^[13]的研究表明,这种计算方法过于简化。Green 等^[14-15]采用能量法进行考虑多维地震荷载作用的等效循环周数计算,其中假定地震荷载各向分量相等。然而,理论研究和震害经验表明,地震荷载是多维的,且各向分量大多具有较大差异;另外,Green 等提出的能量法,虽然能考虑多向地震作用的影响,但对动力本构关系具有严格的要求,从而在实际运用中尚无法广泛应用。陈青生等^[16]借助数值方法,提出了一种考虑地震荷载多维效应的等效循环周数计算方法,初步得出了一些结论,并将有关结论应用到多维地震作用下砂土震陷分析^[17]。

由于当前试验设备尚无法进行多向随机荷载激励,本文采用有限元数值方法模拟不同砂土试样在多向和单向地震荷载输入条件下的动循环单剪试验,选取覆盖大震、中震、近场、远场及不同土质条件的 148 组多向地震输入时程对不同砂土试样分别进行单向和多向加载,结合 Seed 等^[5]提出的转换方法,建立考虑多向地震荷载作用的等效循环周数计算模型。

2 模拟试验

文中借助有限元数值方法建立砂土试样模型单

元,通过模拟对试样施加真实的试验条件(固结压力、应力、应变以及排水),可有效地计算砂土试样在多向地震荷载作用下的动力响应特征。本文动单剪试验采用 SUMDES 程序^[18]的 TESTMODL 模块进行模拟计算。

2.1 简化亚塑性边界模型

本构关系采用弹塑性边界模型,可有效地反映不同固结土体的动力非线性特征。边界面理论取消了屈服面的概念,不需要大量的嵌套面来表达土的塑性关系,特别适用于周期荷载。

边界面概念允许塑性变形以及与之相关联的材料硬化在一个边界面逐步形成,如同屈服面一样,边界面可以用一个单值函数来表示:

$$F = F(\bar{\sigma}_{ij}, q_n) = 0 \quad (1)$$

式中: $\bar{\sigma}_{ij}$ 是一个虚应力,它为真实应力 σ_{ij} 的函数; q_n 是一组内部状态变量。

边界面模型弹塑性刚度张量为

$$D_{ijkl} = E_{ijkl} - h(L) \frac{\left[E_{ijml} \frac{\partial F}{\partial \bar{\sigma}_{mn}} \right] \left[\frac{\partial F}{\partial \bar{\sigma}_{pq}} E_{pqkl} \right]}{\left[\frac{\partial F}{\partial \bar{\sigma}_{ab}} E_{abcd} \frac{\partial F}{\partial \bar{\sigma}_{cd}} \right] + K_p} \quad (2)$$

式中: i, j, k, l 等脚标均为张量脚标; $h(\square)$ 为 Heaviside 函数; 塑性模量 K_p 为真实应力及虚应力之间距离的函数; L 为荷载指数:

$$L = \frac{1}{\bar{K}_p} \frac{\partial F}{\partial \bar{\sigma}_{ij}} d\bar{\sigma}_{ij} \quad (3)$$

其中

$$\bar{K}_p = - \frac{\partial F}{\partial q_n} \gamma_n \quad (4)$$

式(2)与一般的弹塑性刚度张量相比,其形式一样,但边界面取代了屈服面,边界面上的虚应力扮演经典塑性理论中屈服面上真实应力的角色。

2.2 模型参数

简化亚塑性边界模型采用较多的参数全面地考虑土体的非线性特征,正确理解模型参数意义并获得可靠的参数是有效地利用简化亚塑性边界模型的前提。主要的参数包括:

(1) 弹性剪切模量 G_0

其表达式为

$$G_0 = G_{\max} \frac{1 + e_0}{(2.973 - e)^2} \frac{1}{\sqrt{\sigma'_m p_{\text{atm}}}} \quad (5)$$

式中: $G_{\max}$ 为应变水平很低时对应的剪切模量; e_0

为初始孔隙比; σ'_m 为平均有效法向应力; p_{atm} 为标准大气压力。

(2) 土体各向初始卸载压缩性常数 κ

其值可以由试验结果取值或者按下式进行估算, 其中 ν 为土体泊松比。

$$\kappa = \frac{3(1+e_0)^2(1-2\nu)}{2G_0(2.973-e_0)^2(1+\nu)} \quad (6)$$

(3) 土体各向初始加载压缩性常数 λ

$$\frac{de}{dp} = \frac{\lambda}{\sqrt{\sigma'_m p_{atm}}} \quad (7)$$

若无试验值, 一般地, 取 λ 为 5 倍的 κ 值。

(4) 表征剪应变模量和剪应变关系的常数 h_t

其值可由 G_{max}/G 和 γ 之间关系确定。

(5) 表征卸载过程中剪应变引起的平均有效应力变化率参数 d

d 是影响土体抗液化的主要参数。对于砂土, d 一般取值范围在 0.5~5.0 之间, 取值越大, 抗液化能力越强; 对于黏土或进行总应力分析时, 取 d 值为 100。

(6) 相转换线与破坏线的斜率比 R_p/R_f

对于黏性土, R_p/R_f 取值为 1; 对于砂土, 其取值范围在 0.7~0.8 之间, 一般地取值为 0.75。

(7) 表征剪切荷载引起的有效平均法向应力变化量 k_t

k_t 值大小表征土体抗液化能力。其取值范围在 0.1~0.5 之间, 取值越大, 抗液化能力越强。进行总应力分析时, k_t 值取 100。

2.3 模型参数确定

边界面模型在参数确定上较为麻烦, 这主要表现在不仅模型参数繁多, 而且有一些参数物理意义模糊, 无法由土工试验直接确定。要有效地利用弹塑性边界面模型计算不同的实际情况, 必须通过试验和计算获得可靠的参数。

土的常规动力参数如模量、阻尼等, 本文直接由室内试验结果给出, 而弹塑性模型中的其他特殊参数, 如 h_t 等, 反应了砂土剪胀(缩)性等特殊性, 没有明确的物理意义, 所以必须由室内试验数据和响应的调参程序来共同确定。调参程序与动力分析程序不同, 在调参程序中, 通过模拟真实的试验条件, 主要是固结压力、应力和应变条件, 在简谐荷载激振的动应力下, 计算有效应力变化, 得到循环振动的应力-应变曲线, 然后调节参数使程序的计算与试验结果吻合, 则可确定各参数。

Stewart 等^[19]分别通过对不同相对密度的 Silica2[#]净砂和不同细颗粒土含量的 Silica2[#]净砂进行动单剪试验, 激振荷载为频率 1 Hz 的简谐荷载。基于此, 通过室内试验与模拟计算值的校核可真实地确定各砂土试样模型计算参数, 各砂土试样模型参数如表 1 所示。

表 1 不同相对密度 Silica2[#]砂土弹塑性边界面模型参数

Table 1 Parameters of the reduced order bounding surface model for Silica #2 sand with different relative densities

土样标号	D_r /%	ϕ /(°)	G_0 /kPa	λ	κ	h_t	d	R_p/R_f	k_t
SD45	45	30	110.886	0.016 4	0.003 28	0.268	0.80	0.75	0.025
SD60	60	30	112.303	0.014 7	0.002 94	0.268	0.95	0.75	0.050
SD80	80	30	114.130	0.012 6	0.002 53	0.268	1.35	0.75	0.450
SD100	100	30	115.880	0.010 9	0.002 18	0.268	1.20	0.75	1.000

3 地震荷载

地震动是多维的, 同时具有强烈的随机性。不同震级、震中距和场地条件的地震动特征差异显著。因而, 等效循环周数计算应考虑多向振动的影响, 须考虑震级、震中距和场地条件等因素的影响。为此, 本文搜集了包括中国、美国、日本、土耳其、伊朗等国家的 31 次地震记录, 为使选取的地震动具有代表性, 每次地震取 5 组记录, 每组为具有两个水平方向完整记录的地震动时程, 计 310 条记录。5 级以下地震动破坏性较小, 不予考虑; 8 级以上地震的记录又非常少, 也不在统计之列。这些地震记

录覆盖了大震、中震、近场、远场及不同的土质条件。将所选取的记录按照震级不同分为 5.0~6.0、6.0~7.0、7.0~8.0 共 3 个级别; 按照震中距分为 0~50、50~100、100~200 km 共 3 个级别, 如表 2 所示。因篇幅所限, 略去具体的地震记录。

4 地震荷载等效循环周数计算模型的建立

数值计算采用具有完整双向水平地震记录的应变-时程作为地震荷载输入, 假定双向地震荷载应变-时程峰值分别为 γ_{max1} 和 γ_{max2} 。首先将各组地震荷载分量对砂土试样分别进行单向和双向加载, 测

定单向和双向地震荷载作用下砂土竖向应变值。对于单向地震荷载作用的等效循环周数,以 0.65 倍地震荷载应变峰值(即 $0.65\gamma_{\max 1}$ 和 $0.65\gamma_{\max 2}$)为等效循环荷载幅值,根据单向地震荷载与单向等幅循环荷载作用引起砂土竖向应变值等效,由 Seed 等效转换原理计算一维等效循环周数 N_1 ;对于双向荷载作用的等效循环周数计算,为考虑多向地震荷载的共同作用,以 $0.65\gamma_{\max 1}\gamma_{\max 2}$ 为等效荷载幅值,同样由 Seed 等效转换原理计算多维荷载作用的等效循环周数 N_2 。为了表征多向地震荷载作用对于砂土震陷分析中等效循环周数的影响,本文采用了多向地震荷载共同作用的等效循环周数与传统单向地震荷载作用的等效循环周数比值 β (下文简称“等效循环周数比”),亦即 $\beta = N_2 / N_1$ 。

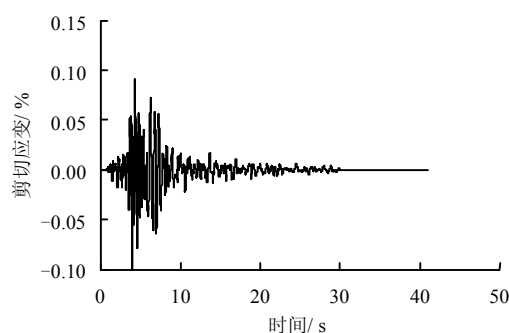
4.1 建立过程

下面以地震记录 No.A-GRV060 与 No.A-GRV330 作为地震荷载输入,以相对密度为 45% 的砂土试样为例分析计算结果,同时介绍多维地震荷载等效循环周数计算过程。地震动时程输入曲线分量 No.A-GRV060 与 No.A-GRV330 分别如图 1(a)、1(b)所示,最大剪应变分别为 $\gamma_{13\max} = 0.100\%$ 和 $\gamma_{23\max} = 0.132\%$ 。

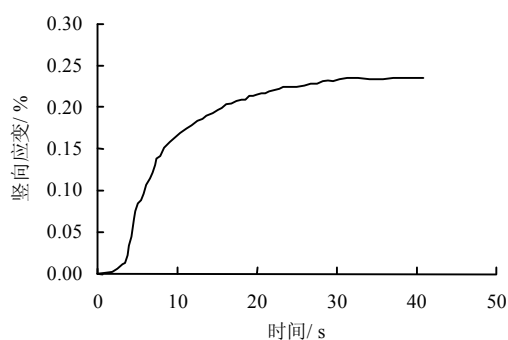
首先,对砂土试样施加单向地震荷载分量 No.A-GRV060 与 No.A-GRV330,单向荷载作用下动循环单剪模拟试验计算结果分别如图 2(a)、2(b)所示。由图可知,单向地震荷载分量 No.A-GRV060 与 No.A-GRV330 作用引起的砂土试样竖向应变分别为 0.233% 和 0.216%。

表 2 地震动记录分组
Table 2 Grouping of earthquake records

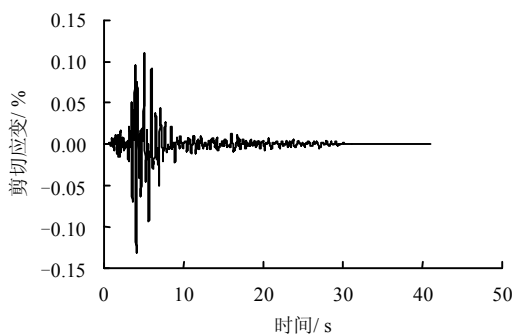
震级范围	震中距范围 R/km	震级 M				震中距 R/km				组数
		最小值	最大值	中值	平均值	最小值	最大值	中值	平均值	
5~6	0~50	5.0	6.0	5.40	5.50	8.2	36.6	12.20	17.29	15
	50~100	6.0	6.0	6.00	6.00	52.4	78.3	65.30	64.88	15
6~7	0~50	6.0	6.9	6.40	6.39	11.8	49.9	31.35	31.29	35
	50~100	6.0	6.7	6.60	6.38	51.6	86.6	65.30	66.12	15
	100~200	6.0	6.8	6.70	6.66	51.6	124.7	86.60	89.03	15
7~8	0~50	7.1	7.6	7.40	7.38	14.3	48.7	33.80	31.48	30
	50~100	7.3	7.6	7.60	7.49	51.7	96.8	71.60	76.88	15
	100~200	7.3	7.6	7.60	7.49	102.8	199.1	128.40	135.03	15



(a) No. A-GRV060



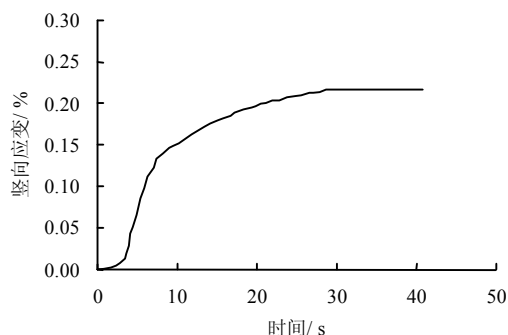
(a) No. A-GRV060



(b) No. A-GRV330

图 1 地震动剪应变-时程曲线

Fig.1 History curves of shear strain for seismic loadings



(b) No. A-GRV330

图 2 竖向应变-时程曲线

Fig.2 History curves of vertical strain

图 3(a)、3(b)分别为单向地震荷载分量 No.A-GRV060 与 No.A-GRV330 作用时砂土试样的应力-应变关系曲线,从图中可知,随着剪应变荷载循环作用周数的增大,剪应力与剪应变曲线坡度先迅速增大后略有减小,这表明土体开始阶段不断密实,当受到较大峰值荷载作用后,砂土试样表现出剪胀现象。

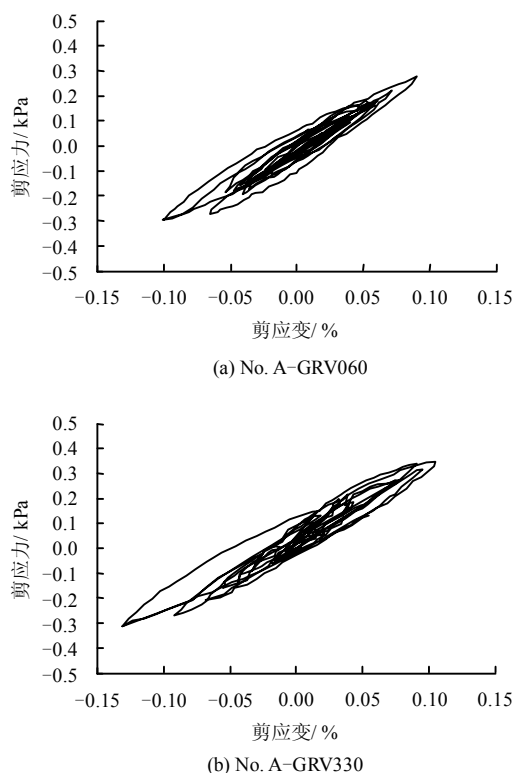


图 3 应力应变关系曲线
Fig. 3 Stress-strain curves

然后,将地震荷载分量 No.A-GRV060 与 No.A-GRV330 共同作用于砂土试样进行动循环单剪模拟试验,图 4 为双向地震荷载共同作用下砂土竖向应变-时程曲线,从图可知,砂土竖向应变值为 0.342%。

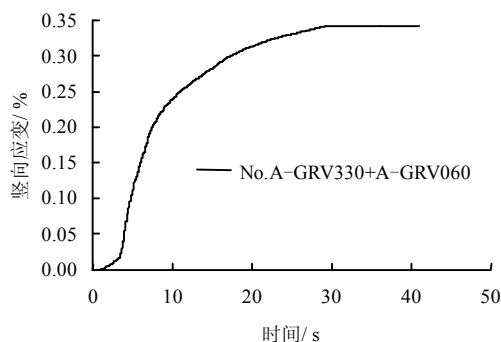


图 4 双向地震荷载作用下竖向应变-时程曲线
Fig.4 History curves of vertical strain due to bidirectional seismic loadings

图 5 则反映了砂土试样应力-应变状态,由图可见,其变化过程较复杂。显然,简单地根据单向地震荷载作用引起的震陷一维荷载等效计算循环周数,应用于实际多维荷载引起的震陷计算分析必然存在很大的局限性。

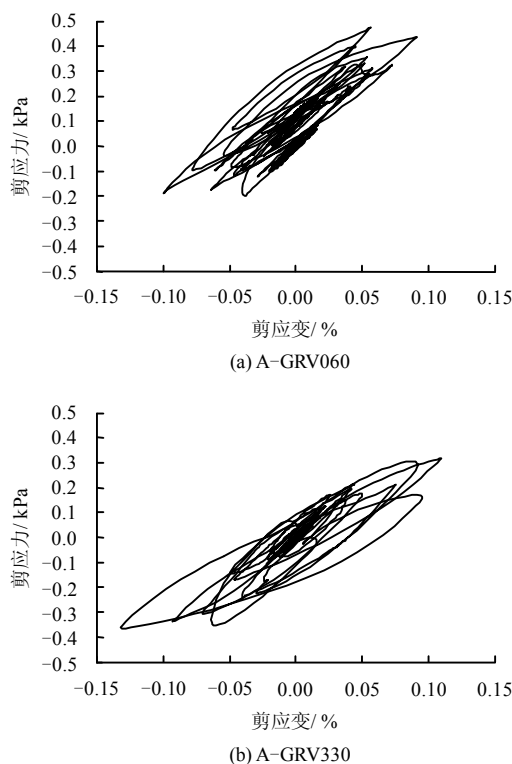


图 5 双向地震荷载作用下应力-应变关系曲线
Fig.5 Stress-strain curves due to bidirectional seismic loadings

接下来,对砂土试样施加幅值分别为 $0.65 \gamma_{13\max}$ 、 $0.65 \gamma_{23\max}$ 、 $0.65 \gamma_{13\max} \gamma_{23\max}$ (即幅值分别为 0.065%、0.086%、0.075%) 的简谐荷载,进行动循环单剪试验,计算地震荷载作用下引起砂土竖向应变分别为 0.233%、0.216%和 0.342%时所需的等幅荷载循环周数 $N_i (i=1, 2)$ 和 N , 其中频率为 1 Hz。图 6 是剪应变幅值为 0.065%的简谐荷载循环作用 100 次进行动循环单剪试验的模拟结果。假定在简谐荷载作用下,砂土竖向应变随着循环周数呈线性增长关系,由图 6 可知,地震荷载分量 No.A-GRV060 作用引起 0.233%的竖向应变等效于振幅为 0.065%简谐荷载循环作用 24 周,即地震荷载分量 No.A-GRV060 的等效循环周数为 24。类似地,可知地震荷载分量 No.A-GRV330 及 No.A-GRV330 与 No.A-GRV060 共同作用对应的等效循环周数分别为 16、28,其循环周数比 β 分别为 1.2 和 1.8。

根据上述方法,分别计算本试验采用的所有不同震级和震中距的各组地震荷载-时程曲线对应的

等效循环周数及等效循环周数比。

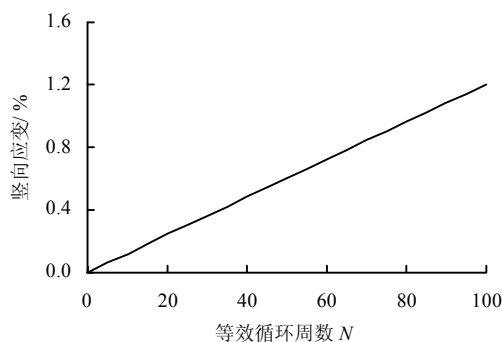


图 6 竖向应变与等效循环周数

Fig. 6 Vertical strain vs. equivalent cyclic number

4.2 建立模型

使用混合效应回归分析建立地震荷载等效循环周数模型。混合效应模型是随机问题统计分析的重要模型，在强随机性和强不确定性问题回归分析中被广泛采用。混合效应模型由固定效应和随机效应 2 部分组成，既可以反应总体的平均变化趋势，又

可以提供多种信息反映个体数据之间的差异。

另外，在处理不规则及不平衡数据及在分析数据的相关性方面具有其他模型无法比拟的优势，在分析重复测量和纵向数据及满足假设条件时体现出灵活性。

将 310 条地震记录中 296 条有效记录分别按震级和震中距不同进行分组，并对砂土试样进行加载计算。通过对不同砂土震陷分析中地震荷载等效循环周数随震级和震中距变化趋势进行对比和分析，利用混合效应回归分析模型，设定函数关系，并不断修正，最终建立等效循环周数与震级和震中距关系的预测模型为

$$N_{eq,\gamma} = \text{Exp}(C_1 + C_2 R^{1.65} + C_3 R^{0.65} + C_4 M^3) \quad (8)$$

式中： $N_{eq,\gamma}$ 为剪应变等效循环周数； $C_1 \sim C_4$ 为回归系数； R 为震中距 (km)； M 为震级。

不同砂土相对密度工况下，单向和双向地震荷载输入对应的预测模型回归系数如表 3 所示。

表 3 回归分析结果统计表
Table 3 Regression analysis results

相对密度 /%	地震作用	C_1	C_2	C_3	C_4
45	单向	1.661 3 (0.000)	-0.3443×10^{-3} (0.000)	0.087 5 (0.000)	0.003 3 (0.000)
	双向	2.042 2 (0.000)	-0.2951×10^{-3} (0.000)	0.081 3 (0.000)	0.003 6 (0.000)
60	单向	1.969 2 (0.000)	-0.2509×10^{-3} (0.000)	0.079 1 (0.000)	0.002 6 (0.000)
	双向	2.745 9 (0.000)	-0.1918×10^{-3} (0.018)	0.071 0 (0.000)	0.002 2 (0.000)
80	单向	2.025 4 (0.000)	-0.3333×10^{-3} (0.000)	0.085 0 (0.000)	0.002 9 (0.000)
	双向	2.867 3 (0.000)	-0.2539×10^{-3} (0.003)	0.074 4 (0.000)	0.002 4 (0.000)
100	单向	2.272 8 (0.000)	-0.2900×10^{-3} (0.000)	0.071 3 (0.000)	0.002 5 (0.000)
	双向	3.021 8 (0.000)	-0.2300×10^{-3} (0.007)	0.066 6 (0.000)	0.002 3 (0.000)

注：括号中的数字为显著性水平 p 值。

4.3 结果分析

回归预测模型是否可用于实际预测，取决于对回归预测模型的检验和对预测误差的计算。回归方程只有通过各种检验且预测误差较小，才能将回归方程作为预测模型进行预测。

显著性水平 p 值是反映结果可靠程度的一种递减指标，0.05 的 p 值通常被认为是可接受误差的边界水平，即需满足 $p \leq 0.05$ 。表 3 括号中的数值是 p 值，从表中数据可以看出，所有回归系数的 p 值均小于 0.05，即各个系数在统计意义上是显著的。

残差分布分析也是分析预测模型可靠性的一个途径。所谓残差是指实际值与预测值的差值。由于

篇幅限制，本文以砂土相对密度为 45% 的工况为例进行说明。图 7 是其在双向地震荷载输入时的残差与震中距的关系图。由图可知，各残差值随震中距的分布基本对称于残差零轴。对于其他工况，可以得到相似的结果。这说明回归模型是可靠的。

本文在 3 个不同级别震级 ($M = 5.5, 6.5$ 和 7.5) 下，输入实测地震曲线计算，得到实测等效循环周数，建立实测等效循环周数与震中距的关系曲线，同时，利用前文提出的预测模型，建立了预测值与震中距的关系曲线，从而分析预测模型的可靠性。由于篇幅限制，本文仍以砂土相对密度为 45% 的工况为例进行说明。

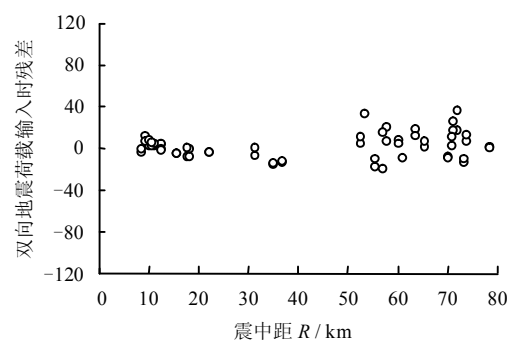
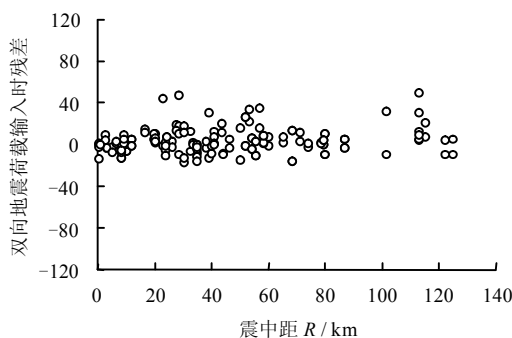
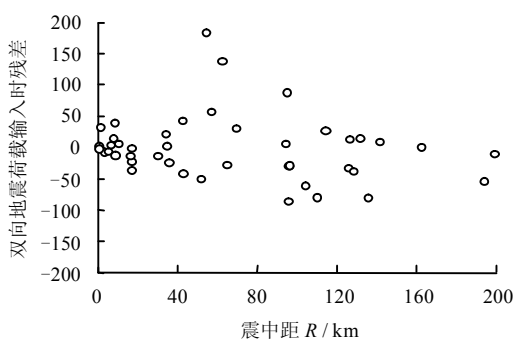
(a) 震级 $M=5\sim6$ (b) 震级 $M=6\sim7$ (c) 震级 $M=7\sim8$

图 7 不同震级残差随震中距的分布

Fig.7 Residuals vs. site-to-source distance for various magnitudes

图 8 是双向地震荷载输入时的不同震级等效循环周数预测值与实测值随震中距的分布图。图中实测值表示考虑地震荷载两个分量共同作用对应的实测等效循环周数；预测中值分别表示 $M=5.5$ 、 6.5 和 7.5 三个震级对应的等效循环周数值。预测值的标准差范围分别以预测中值 $+\sigma$ 和预测中值 $-\sigma$ 限定，其中 σ 为标准差。从图中可以看出，预测值能够很好地反映实测值的变化趋势，同时 70% 以上的实测数据均在整体标准差范围内。对于其他工况，也可以得到类似的结果。

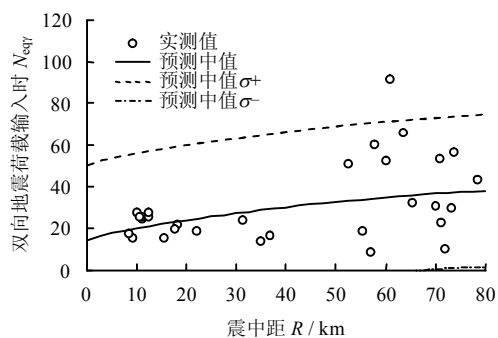
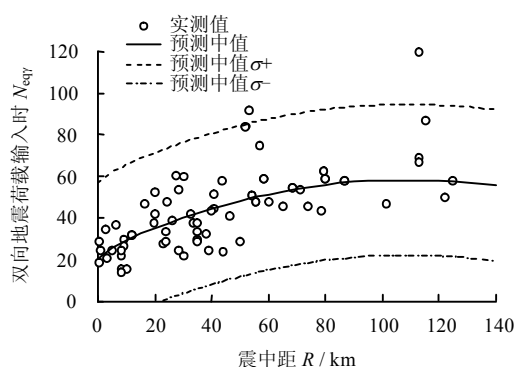
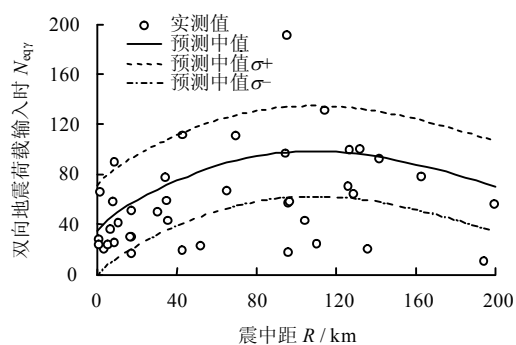
(a) 震级 $M=5.5$ (b) 震级 $M=6.5$ (c) 震级 $M=7.5$

图 8 不同震级等效循环周数预测值与实测值随震中距的分布

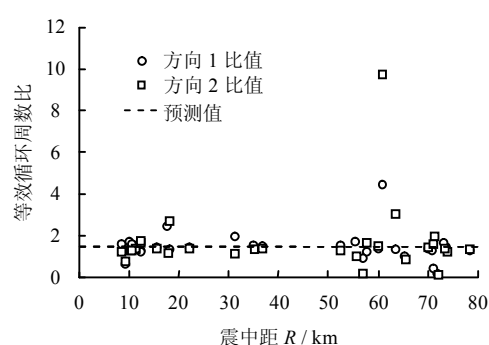
Fig.8 Predicted equivalent cyclic number and observed equivalent cyclic number vs. site-to-source distance for various magnitudes

从上述 4 个工况等效循环周数预测值与实测值随震中距的分布和变化趋势可以发现，不同震级对应的等效循环周数随震中距的变化趋势不同。震级 $M=5.5$ 时，等效循环周数随着震中距的增大而不断增大；震级 $M=6.5$ 时，大约在震中距 80 km 范围内，等效循环周数随着震中距的增大而增大，但在震中距 80 km 范围外，等效循环周数随着震中距的增大而表现出少量减小趋势；这一现象在震级 $M=7.5$ 情况下表现得更加明显。这一特征与 Stafford 等^[10]的研究结论相一致，主要是由不同震

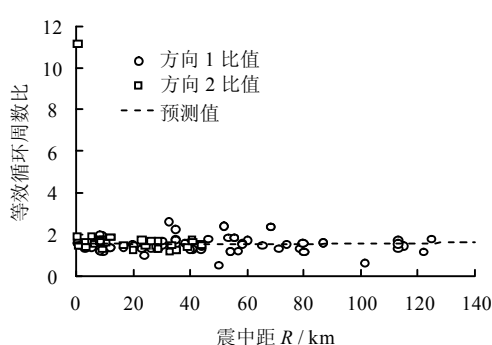
级和震中距对应的地震动频率差异造成的。大震级地震生成的地震动频率分布较广，而其中高频地震动随着震中距的增大迅速衰减，从而削弱了对等效循环周数的贡献，导致大震级对应的地震动等效循环周数在较大震中距范围外呈现衰减趋势。

4.4 多维地震等效循环周数计算

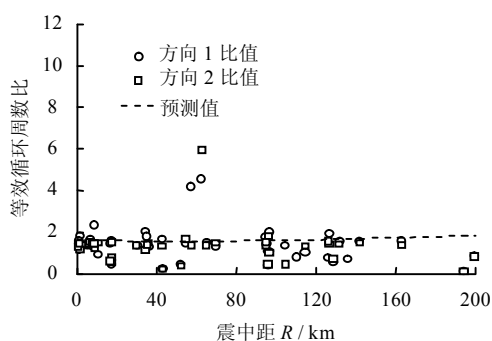
若采用前文中方法计算了考虑双向和单向地震荷载作用的等效循环周数后，就可进一步计算其比值，即等效循环周数比值 β 。以砂土相对密度为45%的工况为例（其他工况类似），图9中方向1比值与方向2比值分别表示相互垂直的两个单向地震荷载所对应的等效循环周数比（实际值）。



(a) 震级 $M=5\sim6$



(b) 震级 $M=6\sim7$



(c) 震级 $M=7\sim8$

图9 等效循环周数比预测值与实测值随震中距的分布
Fig.9 Predicted equivalent cyclic number ratio and observed equivalent cyclic number ratio vs. site-to-source distance

根据前述建立的双向等效循环周数预测模型，同时可计算出双向地震荷载作用时的等效循环周数预测值，它与单向地震荷载作用的等效循环周数的比，即等效循环周数比预测值，同样如图9中示出。从图中可看出，等效循环周数比预测值能很好地反映实际值变化趋势。由于等效循环周数预测模型是基于不同震级、不同震中距和不同土质条件地震记录的基础上建立起来的，能反映震级、震中距及场地土质条件的影响。因而，采用等效循环周数比的预测值来反映多维地震荷载对等效循环周数比的影响是可行的。

由图9可见，等效循环周数比几乎不受震中距大小影响，影响程度可以忽略不计，于是可取不同震中距范围的等效循环周数比平均值作为某一震级范围内砂土对应的等效循环周数比。由此计算可知，不同震级范围内不同相对密度砂土对应的等效循环周数比分别如表4所示。从表中可看出，在不同震级范围内，等效循环周数比均随着相对密度的增大而增大；但对于同一相对密度的砂土，等效循环周数随着震级的变化规律不明显。

表4 等效循环周数比

Table 4 Equivalent cyclic number ratio

震级	不同相对密度 $D_r(\%)$ 下的等效循环周数比			
	45	60	80	100
5~6	1.5	1.9	2.0	2.0
6~7	1.6	1.8	1.9	2.1
7~8	1.7	1.8	1.8	2.1

多维与一维地震荷载等效循环周数比建立后，采用当前常用方法进行一维荷载等效循环周数计算，然后将计算值与对应工况下的等效循环周数比相乘即可获得多维地震荷载共同作用对应的等效循环周数。

5 结 论

(1) 基于不同震级、不同震中距和不同土质条件地震记录的基础上建立等效循环周数预测模型，它能反映震级、震中距及场地土质条件的影响，模型预测值能较好地反映等效循环周数实际值的变化趋势。根据模型可知，等效循环周数随着震级的增大而增大；等效循环周数随震中距的变化存在一个临界值（震中距80 km），震中距在临界值范围内时，等效循环周数随着震中距的增大而增大，震中距大于该临界值时，等效循环周数将随着震中距的增大而减小。

(2) 震中距大小对等效循环周数比影响小, 影响程度可忽略不计; 震级的大小等效循环周数比的影响规律不明显。

(3) 砂土特性对等效循环周数比影响较大, 在不同震级范围内, 等效循环周数比均随着相对密度的增大而增大, 对应于相对密度为45%、60%、80%、100%的净砂, 等效循环周数比分别近似为1.60、1.85、1.90和2.05。结合该比值, 可以较好地应用本文方法进行多维地震荷载等效循环周数计算。

参 考 文 献

- [1] CHEN Qing-sheng, GAO Guang-yun, YANG Jun. Dynamic response of deep soft soil deposits under multidirectional earthquake loading[J]. **Engineering Geology**, 2011, 121(1-2): 55-65.
- [2] 高广运, 陈青生, 何俊锋, 等. 地下水位上升对上海软土地震反应的影响[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(7): 989-995.
GAO Guang-yun, CHEN Qing-sheng, HE Jun-feng, et al. Effect of rise of ground water table on seismic ground response of soft soil in Shanghai[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(7): 989-995.
- [3] 陈青生, 高广运, 何俊锋. 地震荷载不规则性对砂土震陷的影响[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3713-3720.
CHEN Qing-sheng, GAO Guang-yun, HE Jun-feng. Effect of irregularity of earthquake loading on seismic compression of sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(12): 3713-3720.
- [4] GREEN R A. Energy-based evaluation and remediation of liquefiable soils[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [5] SEED H B, IDRIS I M, MAKDISI F, et al. Representation of irregular stress time histories by equivalent uniform stress series in liquefaction analysis[R]. California: University of California, Berkely, 1975.
- [6] ANNAKI M, LEE K L. Equivalent uniform cycle concept for soil dynamics[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1977, 122(11): 929-93.
- [7] 何广讷. 土工的若干新理论研究与应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
HE Guang-ne. Several novel theories research and application in civil engineering[M]. Beijing: China WaterPower Press, 1994.
- [8] LIU A H, STEWART J P, ABRAHAMSON N A. Equivalent number of uniform stress cycles for soil liquefaction analysis[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2001, 127(12): 1017-1026.
- [9] BOMMER J J, HANKCOCK J, ALARCON J E. Correlations between duration and number of effective cycles of earthquake ground motion[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2006, 26(1): 1-13.
- [10] STAFFORD P J, BOMMER J J. Empirical equations for the prediction of the equivalent number of cycles of earthquake ground motion[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2009, 29(11-12): 1425-1436.
- [11] 袁晓铭, 孙锐, 孟上九. 土地地震大变形分析中 Seed 有效循环次数方法的局限性[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 207-211.
YUAN Xiao-ming, SUN Rui, MENG Shang-jiu. Limitation of the Seed's method of significant cyclic number in analyzing large deformation of soils during earthquake[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(2): 207-211.
- [12] PYKE R, SEED H B, CHAN C K. Settlement of sands under multidirectional shaking[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1975, 101(4): 378-398.
- [13] 陈青生, 高广运, 何俊锋, 等. 多向地震荷载对砂土震陷的影响[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(7): 1022-1027.
CHEN Qing-sheng, GAO Guang-yun, HE Jun-feng, et al. Effect of multidirectional earthquake loading on seismic compression of sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(7): 1022-1027.
- [14] GREEN R A, TERRI G A. Number of equivalent cycles concept for liquefaction evaluations-revisited[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2005, 131(4): 477-488.
- [15] GREEN R A, LEE J. Computation of number of equivalent strain cycles: a theoretical framework[C]// Proceedings of the Second Japan-U.S. Workshop on Testing, Modeling, and Simulation in Geomechanics. Kyoto, Japan, 2006: 471-487.