

地震易损性评价与结构不完整评估数据：

一种迭代统计方法

文森特 Z.王^①，迈克尔·马莱^②，和安德鲁·修道院^③

摘要：本文提出了一种迭代的统计方法，使用不完整的评估数据评估抗震结构安全。尽管不断改进传统结构评估程序和结构健康监测方法，实际获得的结构鉴定数据往往是不完整的。评估数据遗失的发生可能是归因于数据采集系统中，除其他原因，异常的数据传输过程中发生故障和临界量的不便。该研究开始于一个定量调查地震易损性评价相对于灵敏度通过非信息的定义额外的信息丢失和概率的结构鉴定数据遗失。随后，对于结构鉴定数据，而不是反对一项预防措施，对遗失的补救措施，通过采用配方期望最大化（EM）algorithm. With 合成或实际地震地面加速度参与，EM 算法的有效性嵌入式补救证明了在统计假设的框架典型的线性或非线性迟滞系统的例子测试。借助于自举技术，相关的相关性和遗失概率的影响也检查。DOI：100.1061 / (ASCE) ST.1943 - 541X.0000804。©2013 年美国土木工程师协会。

关键词：地震易损性 统计 数据不完整 缺失数据 不确定性的量化
EM 算法 引导 线性或非线性迟滞系统的分析和计算

1. 介绍

地震活动早已被确定为主要的自然灾害打击的土木结构的需要进行设计。其中一个结构的安全性能的各种措施，是量化关于地震活动的脆弱性预定义的事件发生可能性。其中一个结构的安全性能的各种措施，是量化关于地震活动的脆弱性预定义的事件发生可能性。此事件通常是不可取的，通常可以正式如此描述：对应的地震地面运动的一个给定的强度，结构的利害关系的反应超出规定的约束。实际上，存在的应对方案按照众多利害关系在工程结构的巨大变化。作

①土木工程和物理学院科学讲师，詹姆斯·库克大学。汤斯维尔，昆士兰4811，澳大利亚

（通讯作者）。电子邮箱：vincent.wang@jcu.edu.au

②前者荣誉学生项目，工程和物理学院，詹姆斯·库克大学。汤斯维尔，昆士兰4811，澳大利亚。

③前者荣誉学生项目，工程和物理学院科学，詹姆斯·库克大学。汤斯维尔，昆士兰4811，澳大利亚。

请注意。这个手稿已提交2012年3月24日；批准 2013年1月14日，1月16日在网上公布，2013年。讨论时间开放，直到2014年3月7日；单独的讨论必须提交个人论文。本文是结构工程杂志的一部分，©ASCE, ISSN0733-9445/04013048(13)/25.00 美元。

为宗旨相关的问题，最终的选择是在该结构被调查和具体结构方面研究。例如，对于一个给定的多层钢筋混凝土框架，弯矩在梁柱节点和梁柱单元可以分别作为利害关系的反应时，它的承载能力和变形的性能是首要考虑的。文献在示例中的反应包括位移（Sasani 和明镜 Kiureghian2001；Kafali 和2007年 Grigoriu），偏移（金正日和2004年筱冢；。Lupoi 等人，2006；Choe 等人，2008；Park 等人，2009；切利克和 Ellingwood2010），内力（Lupoi 等人，2006；。Casciati 等人，2008；Choe 等人，2008），和弯矩（Lupoi 等人，），连同其他导出量（奥勒和2006年 BARBAT）和多数量的组合（Cimellaro 等人，2009；Cimellaro 和 Reinhorn2011）。

一旦有利的反应被采用，收集足够的信息来评估它的价值是不可缺少的。所需资料包括结构状况，加载情况，建模等方面考虑，特别要重视的是结构状况。对于结构，构造或刚刚建成的，在结构设计准则它可能是从有关监管得到，如混凝土建筑物[美国混凝土协会（ACI）2011；英国标准协会（BSI）2004年澳洲标准2009]和钢结构（美国钢结构协会（AISC）2010；2005 BSI，澳大利亚标准1998]的规范标准。质量控制程序还可以在新的条件下一些启发建立的结构。当预拌混凝土或预制/ 预制结构组件和组件都参与其中，这是通常情况下的标准质量控制措施，例如，按照 ASTM E122（ASTM2009），以及各种内部 质量控制措施对于结构状况的评价可能会提供一些有用的信息。

与此相反，如果一个结构已经处于服务要相当长的时间被评估，这些数据直接从上述结构设计要求和质量控制程序可能没有后续足够精确易损性分析，因为他们一般不容许可能损坏或劣化到该结构可以承受的。这样的结构鉴定技术有能力推断结构的最新的状况。ASTM C805/C805M（ASTM2008）和 BS EN13791（2007年 BSI），关于这个标准直接的行业惯例。同时多样化的结构鉴定技术经常应用，以提高精确度。沙利文（1991）评估该混凝土的办公楼原位使用的长处无损检测和核心提取。哈森等人在1995比较了那些加载测试结果，研究了混凝土的弹性模量在役桥梁用超声波测量获得和提取岩心。研究了高强混凝土的性能一系列无损评价方法是采用帕斯卡尔等人提出的方案。（2003）。它还指出，统计技术被频繁调用的一个考虑到所涉及的不确定性结构评价方案。Ileshchinsky（1992）回顾了对混凝土强度的无损评价的相关几个统计标准。盖斯肯等人（1998）提出了一个贝叶斯方法与混凝土的弹性到相应的压缩模量强度。梅斯（2002）在受到苛刻的环境条件下制定更新方案经验贝叶斯框架来评估结构的可靠性。最近，一个多学科研究领域，结构健康监测（SHM），增长速度非常快（2011张）。SHM aims 来检测存在结构损伤，查明损坏，其量化程度，并预言其潜在的

发展以及其影响的结构的的使用寿命。在进步 SHM 已经补充传统的结构鉴定技术，增强能力，从而产生用于收购提供服务的结构的当前状态的数据。

持续的研究努力投入结构面积监控，评估和健康毫无疑问越来越多的策略将建造进一步的艺术状态获得最新的数据结构的条件是研究。随之而来的问题是：在实际的情况下收集的数据可能不完整的结构鉴定。结构鉴定资料遗失时数据采集系统的功能原本已经设计。现在它是不寻常的一个数据采集系统由许多传感器，以及安装等因素错误，机械动作，电浪涌和电力中断任何人都可能导致资料遗失在某种程度上。为传感器嵌入结构和期望不断的努力工作结构的的使用寿命期间，有关的问题传感器的寿命和维修和更换计划可能导致数据遗失等。另一个潜在的源，评价数据遗失可以归因于是可靠性，耐久性，和数据传输的工作环境机制。高水平的不良噪音，干扰，和失真可能大大影响的有用的量信息可以从信号中提取的。评价如果扰动不能允许发生数据遗失通过数据传输机制。更具体地说，这包括场合是这样一种干扰时，数据传递机制还没有被设计和制备抗受其影响，或当一些冗余并在数据传输中存在的但不幸的是，机制不足以弥补扰动的不利影响。此外，遗失的结构鉴定数据还可以归因于事实对土建结构性能的关键量并不总是可直接观察或测量很方便。例如，在一个典型的框架建筑非结构元素在天花板和整理可防止框架节点直接测量的访问，因此相关评价数据会丢失。在识别出有代表性的情况下，结构评价数据可能是不完整的，适当的措施可以在这些情况下，需要整理了。有合理的努力一直专注于建立综合预防措施对评估数据的遗失，所表现出的大量的结构鉴定和健康快速发展监测技术。然而，硬币的另一面是对评价数据遗失的发生的可能性仍然是可以忽略不计。如果数据遗失事件发生，其结果是，结构鉴定数据变成不完全的。注意，即使当概率的数据遗失事件是小的，与一个遗失概率个人评价数据点仍然可以相当高，如果事件发生。因此，这将是有趣的和值得的制定一些补救措施，在对比的预防措施，为结构鉴定资料遗失，检查其有效性地震安全性评价。

在下一节中，试点研究，给出了相对于地震易损性评价的敏感性结构评价数据的遗失证明。随后，一个迭代的统计算法制定一个有效的方法来处理不完整与线性系统的应用结构评估数据非线性迟滞系统。一些参数的影响参与讨论。

2. 地震易损性评估的敏感性，评估数据遗失的初步研究

尽管在其他领域大量的研究数据，如生命科学的遗失例，临床研究，作者的知识等，对地震的几个结果土木工程结构的安全性能是可用的。因此，它成为有助于说明由一些简单的例子结构鉴定资料遗失和对脆弱性的影响评价。更多的细节，王等人沿着这条线可以发现，（2011）

例如考虑，一三层剪切型框架建模为三自由度（DOF）的线性动态系统。假设这个故事的刚度有一个三变量正态分布。实际上，这个概率分布的参数，即平均向量和协方差矩阵，可估计从相关结构评估数据，这可能是不完整的。在整个在本文提出的研究，在完全随机缺失（MCAR）假设（heitjan 和巴苏1996）是用来模拟不完全数据的结构鉴定。结构是指其中一个观察到的遗失的条件概率模式所观察到的和丢失的数据等于观察到的模式的遗失概率。那是它本质上假设所观察到的遗失模式统计独立的观察和丢失的数据。让的意思和每三个随机变量的变异系数在故事刚度是 $1.5 \times KN = 104 \text{ m}$ 和0.3分别，假设的任何两个之间的相关性三个随机变量为0.5，图1示出相应的完整和不完整的结构鉴定数据样本15尺寸M。发现丢失的数据表示的空白。可以看出，在图1（b）在评价数据的每个故事经过0.3个遗失概率P，一个总的六，五，和五个数据点的丢失分别对第一，第二，和第三构造。

平均向量的估计，不完整的评估数据被视为三个单变量的样本。协方差矩阵的估计，直接的两个选项的存在，即成对方式和列表的方式。在成对的方式，协方差两个随机变量之间的基于遗失估计这两种模式的实现具有随机变量。在成对的方式表面上的优势是，它似乎最好的数据的情况遗失，当更大的画面估计全考虑层刚度矩阵，证明被怀疑为得到完整的协方差矩阵不一定是半正定。相反，该列表的方式可用于在只观测到的单位没有任何丢失的数据[即，图1中的五着色单元（B）]来估计协方差矩阵。显然，该列表的方式对上的数据遗失信息丢失的第二轮有发生。对于不完整的评估数据说明图1（b），除了16个丢失的数据点，14个观测数据点基本上不有助于协方差矩阵估计如果应用案例的方式。这相当于一个48.3%的附加信息的损失。这里的额外的信息的损失是由数量的百分比量化须预缴的观测数据点相对于总观察到的数据点的数目。更普遍的是，图2（a）图平均附加信息损失的价值遗失概率P和数量的故事。这是明显的平均所观察到的数据点相当一部分须预缴的故事是数量大时。另一个值得关注的是，这一事件的每一单元的概率至少包含一个丢失的数据点，在这里，它被定义为非信息性的概率，越来越高的话任何遗失概率或数量的故事增加。几个非信息性的概率的例子对应的样本数和选择的值遗失概率P呈现在图2（b）。对于那些特别是高概率的非信息性例，通常，甚至不能完全排除估计程序实现，更不用说的水平精度达到。随着在一些列的地震易损性评价实例王等人的记录方式。（2011），探索替代处理不完整的的数据将被评估最好的。

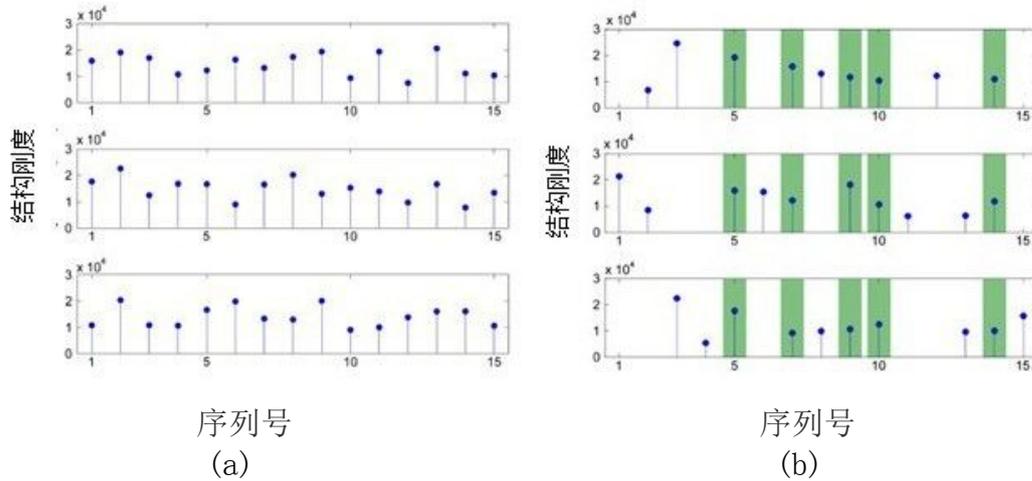


图1，的结构鉴定资料遗失一个例证：（一）完整的评价数据；和（b）的结构不完全评价数据一三层抗剪刚度

3. 线性系统的脆弱性评估和不完整的评估数据

典型的线性系统的脆弱性评价数据的遗失是这部分的处理。

对线性结构系统受到地震地面加速度时间的运动方程历程可以写为：

$$M \ddot{U}(t) + C \dot{U}(t) + K U(t) = -M X(t) \quad (1)$$

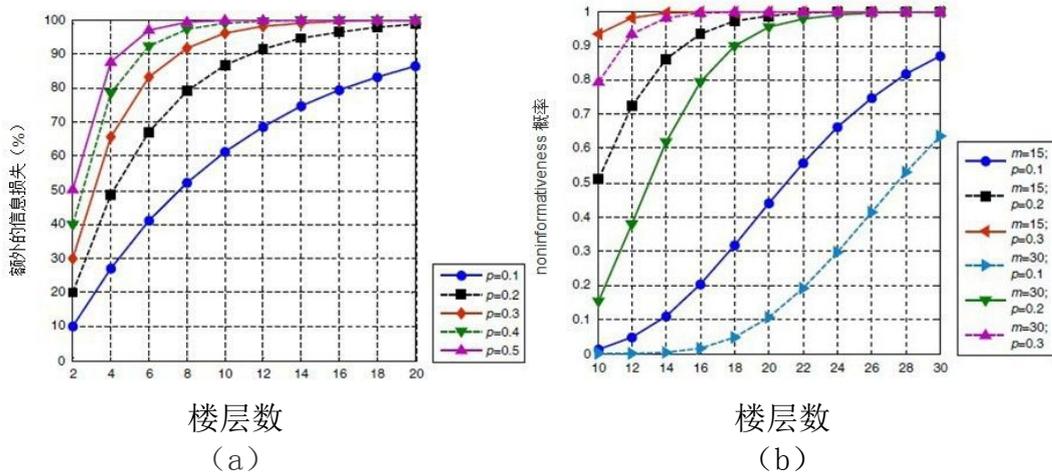


图2，对列的估计程序的问题：（一）附加信息的损失；和（b）非信息性的概率

其中 M , C , K 分别表示的质量, 阻尼, 和刚度矩阵, t 是时间; $U(t)$ 是该结构系统的随机向量位移时程; $X(t)$ 是假定只有水平系统的地震振动的一随机加速度矢量。式 (1) 为相关结构的工程实践中绝大多数。因此, $U(t)$ 只包含的水平位移结构系统的自由度, $X(t)$ 仅仅是基于在水平方向上的 $X(t)$ 地震地面加速度:

$$U(t) = (U_1(t), U_2(t), \dots, U_n(t))^T \quad (2)$$

$$X(t) = (X(t), (t), \dots, X(t))^T \quad (3)$$

特别是在这一部分中, 线性多层剪切帧被认为是在刚度矩阵 K 的简洁性, 所得制剂的类似被扩展到其他类型的线性或非线性的系统, 可以在下一节中的说明。由一个线性的 n 层剪切型框架可以得出刚度矩阵 K

$$K = \begin{pmatrix} K_1 + K_2 & -K_2 & 0 & \dots & 0 \\ -K_2 & K_2 + K_3 & -K_3 & \ddots & \vdots \\ 0 & -K_3 & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & K_{n-1} + K_n & -K_n \\ 0 & \dots & 0 & -K_n & K_n \end{pmatrix} \quad (4)$$

K_i 是一个随机变量, 表示第 i 层的结构刚度 ($i=1, 2, \dots, n$)。因此, 刚度矩阵通过定义为随机向量 K'

$$K' = (K_1, K_2, \dots, K_n)^T \quad (5)$$

设 $f(K' | \theta)$ 是 K' 的联合概率密度函数, θ 包含 n_0 分布参数, 如式 (6)

$$\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n_0})^T \quad (6)$$

下面的一个常见的解释, 地震易损性剪切型框架, 用 q 表示, 如式 (7):

$$q = p \left\{ \max_{0 \leq t \leq T} (|U_1(t)|, |U_{i+1}(t) - U_i(t)| \text{ for } i=1, 2, \dots, n-1) > u_m \right\} \quad (7)$$

其中 T 是所考虑的最大时间; u_m 是预选阈值位移; p 是在概率测度概率空间 (S, \mathcal{F}, P) 和相关的的问题。明显的, 概率 q 的值取决于分布概率 K' , 其他因素。公式 (7) 往往是通过评估在许多工程中的应用一些数值的程序 (例如, 蒙特卡罗模拟)。

估计分布参数 θ_i ($i=1, 2, \dots, n_0$), 随机向量 K' 可以得到结构鉴定和健康监测结果, 结合一些相关的理论或经验的关系, 在适当的地方, 理想的情况下, 这会导致随机抽样 K'_r 如下:

$$K_r' = (k_1, k_2, \dots, k_n) \quad (8)$$

这里

$$k_i = (k_{1i}, k_{2i}, \dots, k_{mi})^T \quad (9)$$

$i=1, 2, \dots, n$; k_i 实现是 K_i 的 m 的样本大小。调用常规规范的最大值，可以得到一个预测/估计。

$$\hat{\theta} = (\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_{n_0})^T \quad (10)$$

由 θ ，进而评价方程 (7) 的地震易损 q 。然而，在第一部分的描述，实际上是一个可能发生数据遗失的事件，这意味着在某些情况下，不是所有的矩阵 K_r' 是可用的。进一步证明，在试点研究中，如果数据收集不完整的 K_r' ，不幸的是不成对的估计程序，也似乎没有成列的有吸引力。由此，提出了采用一种迭代的统计方法称为研究期望最大 (EM) 算法 (Dempster 等人。1977。吴1983；孟和范迪克1997) 提高了在参数 θ 估计性能和依次计 q 的概率。这里有两个步骤 (即，E 步骤和 M 步骤) 在每一次迭代 EM 算法。试探性地，在一个典型的 E 步骤均基于完整的数据估计值向量的共同充分统计量和 M-步骤，然后是在最大似然框架实现更好的估计参数 θ 比较最后一次迭代。两步迭过程一直持续到一些预定义的收敛准则得到满足，得到最终的预测/估计 $\hat{\theta}$ 。收敛准则是在一种向量范数绝对或相对的两个连续迭代之间的误差估计不超过一个给定的正数参数 θ 。严格和完整的 EM 算法可参照前面提到的统计资料发现。从一个简单的情况下的评价，数据遗失被限制到一个单一的节点，上下文详细研究这个迭代的统计功效分别在线性系统的脆弱性评价和一种非线性滞回系统应用的的方法，推迟到下一节。

4. 在单层发生的数据遗失评估

一个10层框架 ($n=10$) 考虑剪切。假设相应的刚度随机向量 K_i 有10元正态分布。因此分布参数 θ 的65个独立条目 ($n_0=65$) 的均值向量和协方差矩阵。此外， K_i ($i=1, 2, \dots, 10$) 假设它的平均值和变异系数分别为 1.5×10^7 KN/m 和 0.3；每对 K_i 和 K_j ($i, j=1, 2, \dots, 10; i \neq j$) 的相关性分别为 0.5。对于 M 的 10-by-10 集中矩阵的对角项等于一质量 1.5×10^6 公斤。通过对矩阵的瑞利阻尼系数减振效果模拟 M 和 K 的计算从模态阻尼比为 0.01 的第一两种模式。水平地震地面加速度的 $x(t)$ ，例如， $x(t)$ 的实现，是基于经典的广泛的 Clough-Penzien 单边功率谱密度 (克拉夫和 Penzien 1993)。本节只关注与线性系统的位移时程， $u_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, 10$)，例如，实现用户界面 $U_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, 10$)，在通过获得与状态空间法相结合的模式叠加。 $x(t)$ 采样频率为 200

赫兹， u_i 的时间步长 ($i=1, 2, \dots, 10$) 为0.005秒。图3显示了 $x(t)$ 和相应的 $u_1(t)$, $u_5(t)$ 和 $u_9(t)$ 。

为了探讨该方法的性能，两个平行的场景的构建是独立的。在第一种情况下，没有数据遗失的事件发生，而10元正态随机向量 K' 完全观察到的30倍 ($m=30$)。这样随机抽样 K'_r 是从一个30-by-10矩阵及其所有的条目获得，这些完整的剪切框评价数据被用来评估地震的脆弱性。相反，假设在第二种情况，评价数据遗失可以只发生在第五层，介绍丢失概率 P 等于0.3，对 K'_s 30个条目的层数，这项丢失的概率为0.3。这是通过与二项式分布30参数和0.7参数实现仿真。在第一种情况下，即完整的数据的情况下， $\hat{\theta}$ 直截了当地计样本均值和样本协方差矩阵；在第二种情况，或不完全数据的情况下，EM 算法得到它。在这项研究中，EM 算法通过 R (R 开发核心环境中实现2011队) 和包装规范，包的新贡献谢弗 (2010)，和收敛标准介绍，这样的两步迭代过程当且仅当所有的对应元素之间的相对差异最大在两个连续的迭代的参数估计不超过0.0001时停止 (Novo 和谢弗2010)。估计的 $\hat{\theta}$ 允许所涉及的不确定性和随机性的特点，每个在两种情况下，整个过程分别进行了30次。因此，得到一个随机抽样大小

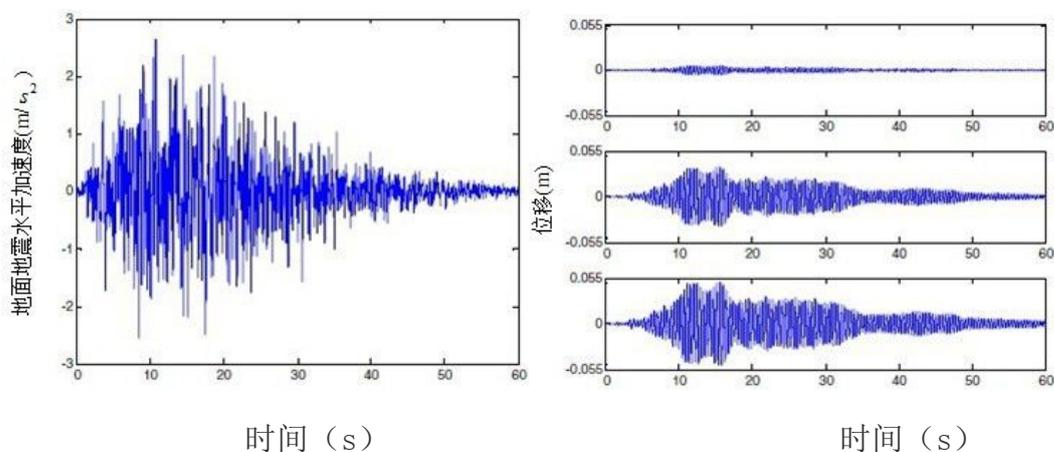
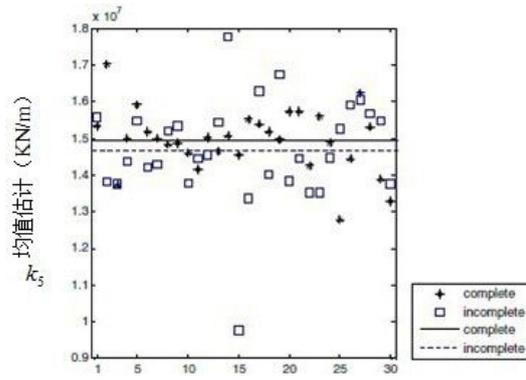
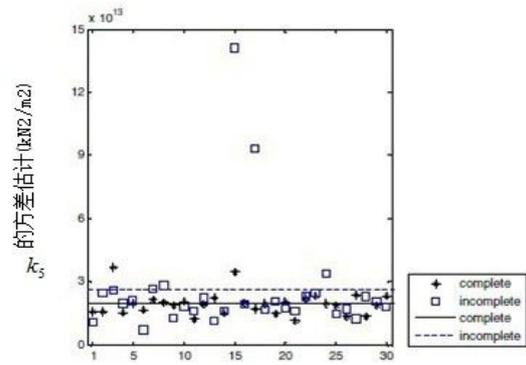


图3。对于10层剪切型框架：(一)的水平地震地面加速度的一个例子；(b)所对应的位移时间在第一(上)，第五(中)，和第九(底部)层



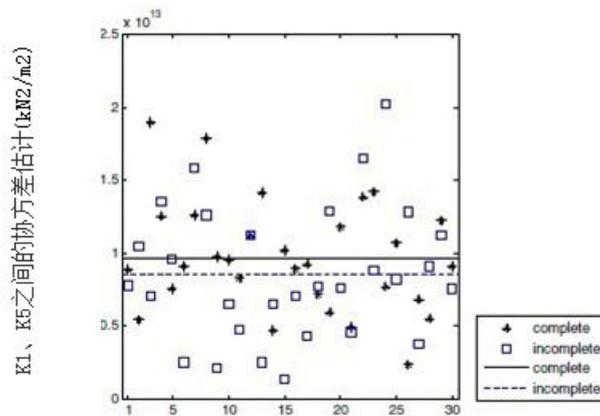
序列号

(a)



序列号

(b)



序列号

(c)

图4。对于评价数据遗失只能发生在第10层的第5层剪切型框架的估计：(a) k_5 均值估计；(b) k_5 的方差估计；(c) k_1 、 k_5 之间的协方差（水平实线和虚线显示相应的样本均值的估计来完全与不完全的数据分别评价，也在无花果。5和7）

的30个 θ_i ($i=1, 2, \dots, 65$)。事实上，这一般产生在完成数据的情况下

$${}^c\hat{\theta}_i = ({}^c\hat{\theta}_{1i}, {}^c\hat{\theta}_{2i}, \dots, {}^c\hat{\theta}_{m_0i})^T \quad (11)$$

在不完全数据的情况下

$${}^i\hat{\theta}_i = ({}^i\hat{\theta}_{1i}, {}^i\hat{\theta}_{2i}, \dots, {}^i\hat{\theta}_{m_0i})^T \quad (12)$$

$i=1, 2, \dots, n_0$ ； ${}^c\hat{\theta}_i$ 和 ${}^i\hat{\theta}_i$ 分别包含 θ_i 估计完整的数据和不完全数据的情况下； m_0 是样本大小。如上所述，在这一部分里 $n_0=65$ 和 $m_0=30$ ，共导致3900的估计。以 k_5 均值估计和方差估计及 k_1 、 k_5 之间的协方差，这是在 θ 出65项作

为一个例子。他们在完整的数据或不完全数据情况下的估计如图4所示，那些在不完全数据情况似乎表现出更大的变异性。事实上，在完全样本标准偏差的估计和不完全数据的情况下分别为 $8.59 \times 10^5 \text{ KN/m}$ 和 $1.42 \times 10^6 \text{ KN/m}$ 由图4 (a)， $5.53 \times 10^{12} \text{ KN}^2/\text{m}^2$ 和 $2.62 \times 10^{13} \text{ KN}^2/\text{m}^2$ ，图4 (b)， $3.81 \times 10^{12} \text{ KN}^2/\text{m}^2$ 和 $4.55 \times 10^{12} \text{ KN}^2/\text{m}^2$ ，图4 (c)。

表1，比较数据的完整和不完整的情况，地震的脆弱性之间的数据的丢失可能只有发生在剪切型框架的线性第五层。

$\xi=0.981\text{m/s}^2$ 时，地震脆弱性样品和假设结果											
试验编号	样本										结果
L1A	0.010	0.005	0.080	0.055	0.026	0.023	0.046	0.051	0.041	0.046	T
	0.013	0.053	0.070	0.060	0.027	0.012	0.024	0.028	0.014	0.014	
L1B	0.009	0.009	0.081	0.061	0.031	0.014	0.041	0.061	0.030	0.034	T
	0.008	0.049	0.074	0.054	0.029	0.012	0.029	0.032	0.018	0.016	
L2A	0.050	0.036	0.065	0.016	0.064	0.046	0.009	0.021	0.031	0.031	T
	0.018	0.055	0.008	0.036	0.343	0.051	0.121	0.004	0.015	0.028	
L2B	0.049	0.027	0.063	0.014	0.070	0.043	0.013	0.017	0.030	0.050	T
	0.016	0.051	0.014	0.029	0.330	0.043	0.120	0.008	0.014	0.034	
L3A	0.023	0.049	0.034	0.020	0.041	0.036	0.033	0.016	0.033	0.055	T
	0.031	0.099	0.035	0.044	0.013	0.024	0.029	0.048	0.009	0.034	
L3B	0.020	0.072	0.032	0.019	0.040	0.056	0.027	0.017	0.043	0.051	T
	0.044	0.096	0.030	0.050	0.010	0.020	0.018	0.043	0.016	0.046	

$\xi=3.924\text{m/s}^2$ 时，地震脆弱性样品和假设结果											
试验编号	样本										结果
L1A	0.792	0.812	0.857	0.871	0.878	0.845	0.871	0.867	0.877	0.853	T
	0.838	0.927	0.861	0.873	0.844	0.888	0.855	0.869	0.869	0.912	
L1B	0.827	0.789	0.873	0.849	0.878	0.840	0.868	0.881	0.890	0.855	T
	0.820	0.916	0.896	0.863	0.877	0.869	0.874	0.881	0.858	0.905	
L2A	0.898	0.819	0.862	0.867	0.883	0.841	0.846	0.872	0.875	0.877	T
	0.878	0.890	0.909	0.873	0.920	0.883	0.908	0.840	0.803	0.900	
L2B	0.878	0.816	0.869	0.853	0.875	0.822	0.861	0.876	0.864	0.884	T
	0.876	0.871	0.895	0.897	0.909	0.906	0.868	0.834	0.807	0.897	
L3A	0.897	0.866	0.814	0.840	0.913	0.862	0.841	0.824	0.873	0.892	T
	0.919	0.878	0.871	0.827	0.827	0.839	0.812	0.854	0.783	0.877	
L3B	0.913	0.842	0.808	0.857	0.922	0.870	0.831	0.818	0.859	0.898	T
	0.909	0.887	0.868	0.867	0.825	0.829	0.820	0.840	0.776	0.866	

注：在每次试验中的第一和第二行分别显示从完整的数据和不完全数据的情况下获得的样品和假设检验的结果，利用逻辑值“T”和“F”分别表示“没有否定 H_0 ”和“拒绝 H_0 ”，表2和表5同样。

表2，比较数据的完整和不完整的情况，数据遗失可以发生在多层线性剪切型框架

$\xi=0.981\text{m/s}^2$ 时，地震脆弱性样本和假设结果											
试验编号	样本										结果
L4A	0.025	0.059	0.022	0.039	0.031	0.058	0.049	0.024	0.055	0.008	T
	0.050	0.028	0.053	0.030	0.021	0.045	0.049	0.040	0.031	0.045	
L4B	0.034	0.061	0.020	0.030	0.033	0.069	0.041	0.028	0.046	0.009	T
	0.039	0.032	0.050	0.017	0.022	0.042	0.045	0.034	0.032	0.033	
L5A	0.033	0.044	0.037	0.075	0.044	0.039	0.006	0.036	0.030	0.036	T
	0.057	0.014	0.079	0.040	0.041	0.028	0.036	0.079	0.054	0.014	
L5B	0.033	0.065	0.040	0.075	0.035	0.058	0.010	0.052	0.037	0.053	T
	0.048	0.018	0.082	0.046	0.040	0.017	0.028	0.072	0.068	0.018	
L6A	0.013	0.036	0.037	0.041	0.031	0.057	0.023	0.041	0.021	0.024	T
	0.056	0.059	0.046	0.039	0.021	0.021	0.053	0.041	0.025	0.098	
L6B	0.019	0.030	0.024	0.044	0.020	0.053	0.027	0.053	0.022	0.017	T
	0.072	0.057	0.045	0.041	0.021	0.032	0.047	0.036	0.021	0.098	

$\xi=3.924\text{m/s}^2$ 时，地震脆弱性样本和假设结果											
试验编号	样本										结果
L4A	0.785	0.892	0.781	0.878	0.836	0.876	0.884	0.871	0.873	0.870	T
	0.867	0.853	0.871	0.852	0.862	0.821	0.860	0.844	0.844	0.890	
L4B	0.785	0.890	0.804	0.850	0.855	0.881	0.891	0.870	0.870	0.875	T
	0.857	0.837	0.896	0.866	0.855	0.812	0.872	0.861	0.828	0.863	
L5A	0.839	0.887	0.831	0.885	0.851	0.865	0.826	0.802	0.848	0.899	T
	0.864	0.817	0.873	0.903	0.881	0.851	0.835	0.871	0.934	0.872	
L5B	0.839	0.882	0.788	0.896	0.894	0.876	0.840	0.823	0.850	0.886	T
	0.888	0.853	0.859	0.897	0.869	0.840	0.838	0.883	0.915	0.858	
L6A	0.866	0.896	0.845	0.922	0.885	0.837	0.892	0.850	0.830	0.856	T
	0.907	0.874	0.890	0.921	0.860	0.831	0.845	0.843	0.853	0.894	
L6B	0.869	0.889	0.835	0.925	0.850	0.853	0.883	0.843	0.867	0.817	T
	0.893	0.856	0.869	0.908	0.864	0.836	0.866	0.844	0.869	0.899	

现在，准备好必要的模块，该地震的脆弱性可寻。对于一个给定的 $\hat{\theta}_i$ ($i=1, 2, \dots, n_0$) 和一个指定的地震烈度，蒙特卡罗模拟是用来计算相应的地震易损性。再次，考虑了涉及的不确定性，在一个指定的地震强度两个样本对于地震易损性构造：

$${}^c q = ({}^c q_1, {}^c q_2, \dots, {}^c q_{m_1})^T \quad (13)$$

在完成数据的情况下

$${}^i q = ({}^i q_1, {}^i q_2, \dots, {}^i q_{m_1})^T \quad (14)$$

在不完全数据的情况下。 ${}^c Q$ 和 ${}^i Q$ 是底层人群从样本 ${}^c q$ 和 ${}^i q$ 分别采取，并表示的累积分布函数 (CDF) ${}^c Q$ 和 ${}^i Q$ 分别通过 $F_{c_n}(z)$ 和 $F_{i_n}(z)$ 。以下构造可以统计假设：

$$\begin{aligned} H_0: \forall z, \quad F_{c_n}(z) &= F_{i_n}(z) \\ H_1: \exists z, \quad F_{c_n}(z) &\neq F_{i_n}(z) \end{aligned} \quad (15)$$

建立这条假设的目的是提供一个决策程序，制定的疗效对于结构的评价数据遗失救济可以评估。在这项研究中的两个样本由柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫测试对假设检验任务完成。特别是3900估计式。(11) 和 (12) 被分为三个试验。试验包括估计的 L1 与第一个下标范围从1到10；试验二包含那些具有第一下标之间11和20；和所有其他的估计属于审判 L3。因此，对应于每一个试验， ${}^c q$ 和 ${}^i q$ 都有一个样本10 ($m_1=10$)。进一步的有助于减少 Monte Carlo 模拟所引入的误差，上述三个试验是独立运行两次，这是由附加的试验结果数的一个字母 A 或 B。例如，第一和第二分别独立试运行试验 L1a 和 L1 的 L1B 表示。 $u_m=0.013$ 米和 $\alpha=0.05$ ，样品和地震脆弱性的假设检验结果由表1给出，那里的脆弱性是相对于峰值地面加速度 $\xi = 0.981\text{m/s}^2$ 或 3.924m 。见表1，有12对假设没有显著差异之间表现出的脆弱的完整的数据的情况下，那些在不完全数据的情况下。一个有吸引力的含义弹出：当一个数据遗失事件时，它似乎是试图制定补救它有用可能产生的脆弱性评价结果差异不显著从那些基于完整的结构鉴定资料。

5. 发生多个层次遗失的评价资料

更复杂的情况下，现在可以看发生在一个以上的故事剪切型框架可以评估数据遗失。作为一个例子，在上述分部假设在 K_r 每个条目有一个为0.15的遗失概率 P。两个平行的情况下（即，完整的数据和不完全数据模拟了情商的情况下）。

(11) (15) - 构造，因此，总结 $n=10$, $n_0=65$, $m=30$, $m_0=30$, $m_1=10$ 。值得注意的是，根据试验研究如果列表用于估计的程序，这套参数值预期会导致76.8%的附加信息的损失。基于一些有代表性的估计 EM 算法，连同那些在获得完整的数据的情况下，绘制在图5

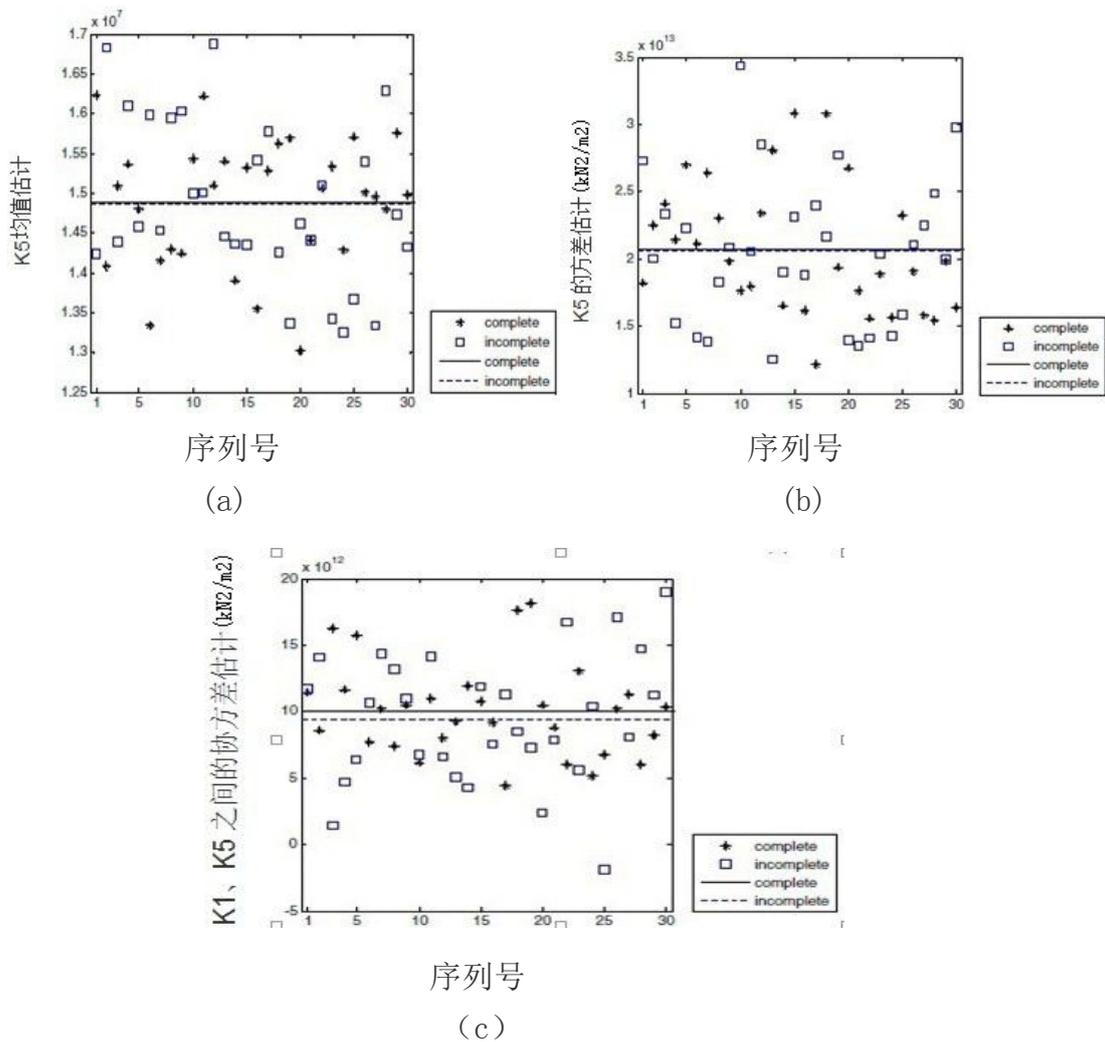


图5. 对于评价数据遗失可以发生在一个以上10层剪切型框架的估计: (a) k_5 均值估计; (b) k_5 的方差估计; (c) k_1 、 k_5 之间的协方差

与估计的样本均值在完成数据的情况下表示的水平实线和那些在不完全数据的情况下的水平虚线, 可以在所有的三个观测子图和特别是在图5 (a) 在样本均值在不完全数据情况下的平均估计不同, k_5 从完整的数据对应的相对误差仅为 0.13%。最终的脆弱性评价结果见表2, 在试验系统中指定的相同的方式在单层的情况下。所有的试验研究, EM 算法嵌入式可以在数据不完整的情况下产生的结果与那些在完成数据的情况下在这个意义上的零假设 H_0 (15) 不能被忽视的水平 $\alpha=0.05$ 。

6. 概率遗失影响的和相关性

研究变量在 K' 之间的随机相关性的影响在10层的框架剪力的脆弱性评估, 两个试验, 即试验 L7和 L8, 设计。在审判 L7之间的相关性 K_i 和 K_j ($i, j=1,$

2, ..., 10; $i \neq j$) 被假定为0.1, 而0.9是用于试验 L8。在每个试验中的自举技术看, 例如 (埃弗龙和 Tibshirani, 1993) 是用于改善仿真效率。特别是, M 引导样本由 ${}^c q$ 的完整数据的情况下, 和另一个我的是基于 ${}^i q$ 不完全数据的情况下:

$${}^c q_i^* = ({}^c q_{1i}^*, {}^c q_{2i}^*, \dots, {}^c q_{m_2 i}^*)^T \quad (16)$$

$${}^i q_i^* = ({}^i q_{1i}^*, {}^i q_{2i}^*, \dots, {}^i q_{m_2 i}^*)^T \quad (17)$$

其中, $i=1, 2, \dots, M$, 和 m_2 是引导样本的大小。对于每对 ${}^c q_i^*$ 和 ${}^i q_i^*$ ($i=1, 2, \dots, M$), 一个可以用到 $E q$ 的比喻。(15) 构造如下所示的统计假设:

$$\begin{aligned} H_0: \forall z, \quad F_{cQ_i^*}(z) &= F_{iQ_i^*}(z) \\ H_1: \exists z, \quad &\in F_{cQ_i^*}(z) \neq F_{iQ_i^*}(z) \end{aligned} \quad (18)$$

其中 ${}^c Q_i^*$ 和 ${}^i Q_i^*$ 是 ${}^c q_i^*$ 和 ${}^i q_i^*$ 相关人群, $F_{cQ_i^*}(z)$ 和 $F_{iQ_i^*}(z)$ 是两者相应结合起来。再次, 对于给定的显着性水平 α , 两样品 柯尔莫哥洛夫 - 斯米尔诺夫检验进行。所有这些 M 的结果检验是由一个录取率 R_a 假设, 这是代表定义为 M_0 的比值 (即, 测试的数量, 其中 H_0 不能显着水平 α) 到 M (即测试数量):

$$R_a = M_0 / M \quad (19)$$

从而, R_a 介于0和100%, 而 R_a 为一个较高的值变化, 可以指示配制补救的卓越性能。注: 这里的含义是, 可能存在一种情况, 即 原假设已被否定。对于 $\xi = 2.453 \text{m/s}^2$, $m=30$, $p=0.3$ 为 K_r' 每个条目, $m_0=30$, $m_1=30$, $M=1000$, $m_2=5, 10, \text{或} 15$, 表3列出了 ${}^c q$, ${}^i q$ 和 R_a 的结果。很显然, 从这两个试验中得出 R_a 的值是相当高。也可以从该表中观察到, 在 R_a 里7.4, 11.7, 或10.6个百分点, 在制定补救的 m_2 值分别有差别 为5, 10, 或15, 在试用 L7进行了比它在审判 L8 相关的配置更好。

关于丢失概率, 2个另外的试验的影响, 即试验 L9和 L10进行了介绍。在试验 L9和 L10的丢失概率 p 为 K_r' 的每个条目分别取为0.25和0.35, 而在这两个试验0.5是可用作 K_i 和 K_j 之间的相关性, ($i, j=1, 2, \dots, 10; i \neq j$)。保持其它参数相同的的相关性的影响, 并进行程序 直接类似于方程。(16) - (19), 将得到的 ${}^c q$, ${}^i q$ 和 R_a 结果总结于表4中。具体地, 当每个条目在 K_r' 是0.35的丢失概率 p 的 R_a 值为85.4%, 85.5%, 86.9%, 分别实现对 $m_2=5, 10$ 或15。与此相反, 如果按列表估计程序被接通 在这种情况下, 97.9%的添加信息的损失将是 预计将发生, 并且非信息性的概率达到0.939为好。

7. 具有不完整的评估数据迟滞系统的脆弱性评估

表3, 在完整的数据和不完全数据的情况下对应于不同的价值相关性的地震脆弱性

试验编号	样本										R_a 接受率 (%)		
											m_2		
											5	10	15
L7	0.490	0.482	0.585	0.535	0.559	0.565	0.606	0.573	0.471	0.572	90.8	91.5	93.1
	0.470	0.560	0.562	0.544	0.559	0.500	0.467	0.587	0.565	0.530			
	0.402	0.421	0.483	0.538	0.488	0.599	0.571	0.470	0.613	0.551			
	0.492	0.656	0.502	0.549	0.519	0.472	0.578	0.635	0.543	0.514			
	0.545	0.465	0.527	0.559	0.647	0.682	0.568	0.470	0.596	0.649			
	0.555	0.534	0.578	0.518	0.522	0.517	0.542	0.561	0.591	0.520			
L8	0.232	0.296	0.219	0.255	0.362	0.339	0.273	0.295	0.242	0.244	83.4	79.8	82.5
	0.242	0.160	0.221	0.240	0.237	0.222	0.293	0.333	0.313	0.238			
	0.186	0.276	0.245	0.342	0.266	0.354	0.288	0.146	0.253	0.273			
	0.394	0.206	0.158	0.260	0.184	0.175	0.233	0.256	0.218	0.212			
	0.226	0.186	0.252	0.307	0.310	0.238	0.293	0.257	0.227	0.266			
	0.231	0.210	0.272	0.319	0.229	0.283	0.284	0.228	0.169	0.160			

注: 从完整的数据和不完全数据的情况下得到的样品分别在每个试验中的第一和第二三行。

表5, 迟滞系统在完全数据和不完全数据的情况下地震的脆弱性之间的比较

$\xi=3.924\text{m/s}^2$ 时, 地震脆弱性样品和假设结果											
试验编号	样本										结果
H11A	0.127	0.115	0.089	0.181	0.048	0.191	0.180	0.122	0.116	0.142	T
	0.182	0.023	0.114	0.126	0.055	0.043	0.128	0.147	0.082	0.053	
H11B	0.098	0.117	0.065	0.165	0.038	0.215	0.203	0.130	0.118	0.148	T
	0.177	0.031	0.101	0.121	0.049	0.040	0.122	0.157	0.085	0.063	

$\xi=7.848\text{m/s}^2$ 时, 地震脆弱性样品和假设结果											
试验编号	样本										结果
H11A	0.715	0.683	0.692	0.710	0.724	0.807	0.720	0.792	0.745	0.725	T
	0.724	0.756	0.804	0.833	0.684	0.695	0.689	0.776	0.756	0.672	
H11B	0.693	0.647	0.688	0.745	0.706	0.795	0.703	0.777	0.748	0.747	T
	0.730	0.768	0.816	0.833	0.636	0.722	0.695	0.780	0.742	0.679	

表4，不同地震的脆弱性在完整的和不完全数据的情况下对应的丢失概率值

试验编号	样本										R_a 接受率 (%)		
											m_2		
											5	10	15
	0.419	0.464	0.407	0.440	0.345	0.385	0.542	0.407	0.317	0.377			
	0.430	0.436	0.423	0.295	0.476	0.449	0.435	0.443	0.392	0.390			
	0.466	0.593	0.466	0.440	0.424	0.344	0.512	0.471	0.427	0.459			
L9	0.394	0.579	0.377	0.464	0.478	0.466	0.403	0.356	0.430	0.427	86.9	85.2	81.4
	0.510	0.389	0.351	0.391	0.393	0.463	0.327	0.430	0.406	0.415			
	0.336	0.372	0.425	0.494	0.422	0.364	0.376	0.397	0.397	0.582			
L10	0.420	0.469	0.374	0.325	0.559	0.329	0.445	0.394	0.506	0.544	85.4	85.5	86.9
	0.412	0.498	0.455	0.372	0.492	0.455	0.432	0.403	0.467	0.480			
	0.473	0.496	0.479	0.391	0.367	0.377	0.458	0.447	0.471	0.533			

注：前三行显示完整的数据的情况下得到的样品，第二和第三个三行是他们各自不完整的情况下两个对应的样本的数据。

经常观察迟滞非线性现象和在地震事件记录的结构工程师，为了进一步研究EM算法嵌入的补救措施的有效性，本节是专门为典型的脆弱性评估迟滞系统（1999 Mostaghel; Mostaghel 和伯德2000），特别是地震地面从实际加速度地震的使用。2011年2月22日，在新西兰南部城市基督城发生M6.3级地震，导致灾难性的生命和财产损失。新西兰地震委员会（EQC），GNS科学与国土信息新地震地面加速度的新西兰（林茨）在地震中抓获分数，使他们通过公开访问土工网相关网站（<http://www.geonet.org.nz/earthquake/historic-earthquakes/top-nz/quake-14.html>）利用这一资源，本节中的脆弱性评价是基于所选择的实地震地面加速度时程，图6（a）。二层双线性滞迟的运动方程考虑剪切框显示在方程，（20）和（21），更多的细节可以在Mostaghel（1999年）和Mostaghel和伯德（2000年）被发现：

$$M\ddot{U}(t) + C\dot{U}(t) + \gamma KU(t) + (1-\gamma)\tilde{K}V(t) = -MX(t) \quad (20)$$

$$\tilde{V}(t) = F(U(t), V(t), U(t), V(t))U(t) \quad (21)$$

其中：

$$V(t) = (V_1(t), V_2(t))^T \quad (22)$$

$$\tilde{K} = \begin{pmatrix} K_1 & -K_2 \\ 0 & K_2 \end{pmatrix} \quad (23)$$

$$F(U(t), V(t), \dot{U}(t), \dot{V}(t)) = \begin{pmatrix} f_0 & 0 \\ -f_1 & f_1 \end{pmatrix} \quad (24)$$

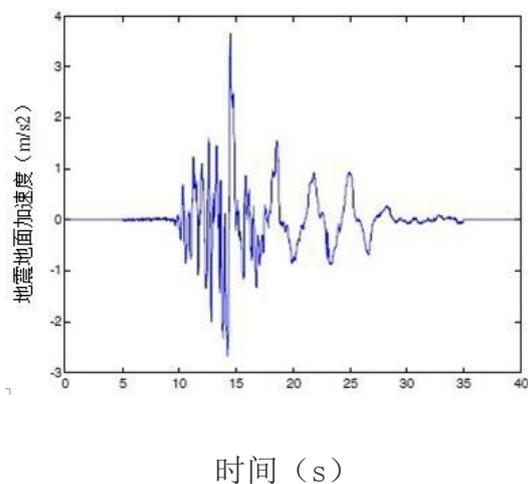
$$f_0 = h_3(\dot{U}(t))(h_4(V_1(t) - \lambda\delta)h_4(U_1(t)) + h_4(V_1(t) - \delta)h_3(U_1(t))) + h_2(U_1(t)) \\ (h_1(V_1(t) + \lambda\delta)h_1(U_1(t)) + h_1(V_1(t) + \delta)h_2(U_1(t))) \quad (25)$$

$$f_1 = h_3(U_2(t) - U_1(t)) (h_4(V_2(t) - \lambda\delta) h_4(U_2(t) - U_1(t)) + h_4(V_2(t) - \delta)h_3 \\ h_1(U_2(t) - U_1(t)) + h_1(V_2(t) + \delta) (U_2(t) - U_1(t)) + h_2(U_1(t))(h_1(V_1(t) + \lambda\delta) \\ h_2(U_2(t) - U_1(t))) \quad (26)$$

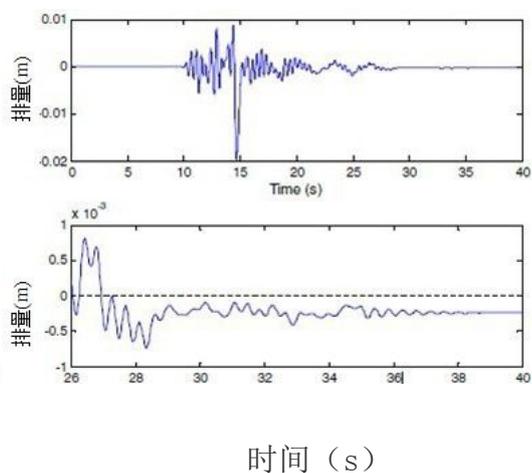
$$h_1(z) = \begin{cases} 1, z \geq 0 \\ 0, z < 0 \end{cases}; \quad h_2(z) = \begin{cases} 0, z \geq 0 \\ 1, z < 0 \end{cases};$$

$$h_3(z) = \begin{cases} 1, z > 0 \\ 0, z \leq 0 \end{cases}; \quad h_4(z) = \begin{cases} 0, z > 0 \\ 1, z \leq 0 \end{cases}; \quad (27)$$

M , C , K , t , $U(t)$ 和 $X(t)$ 被类似地定义为在前一节; $V(t)$ 包含辅助未知函数相关的非线性机制, \tilde{K} 是辅助刚度矩阵; γ 是屈服后到前屈服刚度比, λ 是量化所涉及的拉伸和压缩强度之间的区别; 和 δ 规定的屈服变形时发生。此外, K' , θ , $f(K'|\theta)$, q , K'_r 和 $\hat{\theta}$ 在比喻介绍用线性系统的情况。假设 K_1 和 K_2 具有二元正态分布, 而他们每个人都有一个平均的 $1 \times 10^6 \text{ kN/m}$ 和 0.3 变异系数, 并且它们之间的相关系数为 0.5 。无论是在对角项集中质量矩阵 M 取为 $1.25 \times 10^6 \text{ kg}$ 。该瑞利阻尼用于 C , 其中所涉及的系数从对应于方程的线性系统进行计算。(20) 和 (21) (即, $\gamma = 1$) 为 0.05 两种模态阻尼比该模式。四阶龙格 - 库塔方法应用于执行在时间推进和时间步长被选择为 0.02 秒。为参数 γ , λ , δ , 分别等于 0.15 , 0.1 , 和 0.005 米, 图6 (b) 示出了对应的第一层的位移得到的时程时, 地震地面加速度图6 (a) 的比例是 η , 伪谱加速度与 17.48 弧度/秒, 固有频率和阻尼比为 0.05 , 加速度为 3.924 m/s 。相关联的残余位移与滞后清楚显示于图图6(b), 其中原来的平衡位置的特点是水平虚线线。一个完整的数据场景和不完整数据的情况是设置在相同的方式对上一节中, 从而导出方程 (11) - (15) 。使用的参数概述如下: $n = 2$, $n_0 = 5$, $m = 30$, $m_0 = 10$, $m_1 = 10$, $u_m = 0.02$, $p = 0.3$, $\alpha = 0.05$ 。 K_1 和 K_2 和协方差的方差在 K_1 和 K_2 估计在完整数据的情况由各自的样本统计量, 并在在完整的数据场景由 EM 算法, 并且结果绘制在图7 。对于正在考虑中的数据, 使用 EM 算法可以观察以在不完全数据情况下的估计与那些从完整的) 数据的情况进行更密切的协

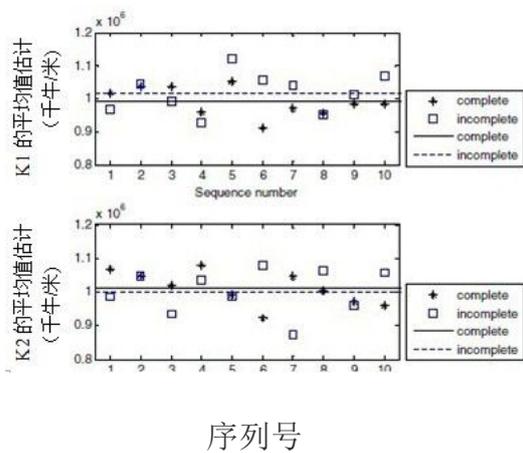


(a)

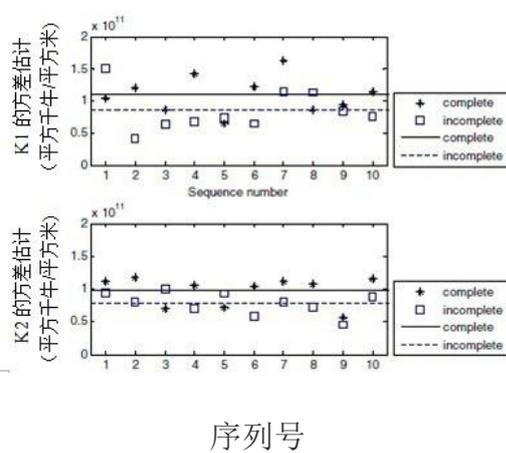


(b)

图6, (a) 2011年2月基督城地震在水平地震加速度以及相应的位移, (b) 在双线性迟滞剪切帧时, $\eta = 3.924\text{m/s}^2$



序列号



序列号

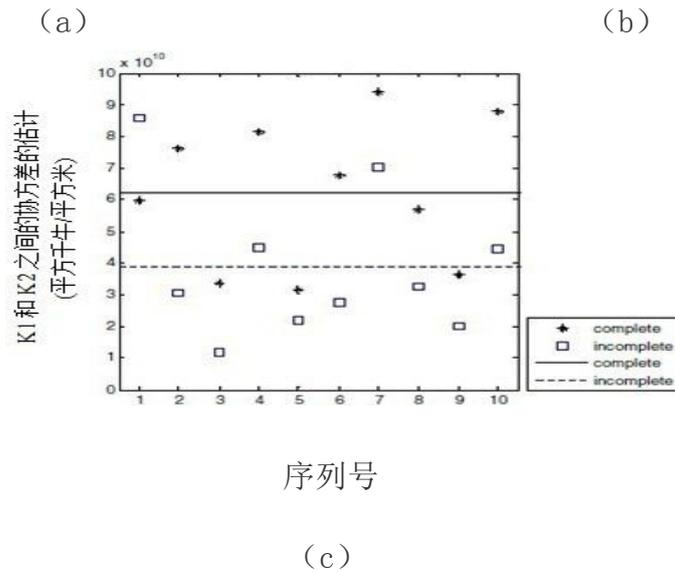


图7, 对于双线性迟滞剪切帧的情况下的估计: (a) 该装置 K1和 K2均值估计 (二) K1和 K2方差估计 (c) K1和 K2之间的协方差估计

议手段比的方差和协方差, 鉴于该按协议分别为图中所描述的估计的样本均值之间的差额的依赖关系, 图7由水平 对于完整的数据和不完整数据实线和虚线 方案。表5列出了结果在试验 H11A 和 H11B, 其中 后缀 A 和 B 分别表示两个独立的整个的运行蒙特卡罗模拟的过程。在每次试验中, 地震脆弱性 样品如方程。(13) 和 (14) 时, 则报告 $\eta = 3.924\text{m/s}^2$ 中或 7.848m/s^2 。除了案件有关前一节中 典型的线性系统, EM 算法嵌入出现补救是还有效的评估数据丢失在滞后剪切帧, 在任何四对条款该假说的方程。(15) 之间的区别。在完全和不完全数据情况下的脆弱性是不统计学足够的显著由两样本可以看出端倪柯尔莫哥洛夫 - 斯米尔诺夫检验与 $\alpha = 0.05$ 。

8. 结论

在接受既成事实数据丢失事件 相关的结构鉴定和健康监测的实践, 地震 脆弱性评估是投作为一个问题涉及不完整 数据。 EM 算法嵌入的补救措施的制定评估数据丢失致力于提供一个思维的超越除了大量的研究现成的替代努力在一些公认的, 快速的进展有密切关系领域 对预防措施的推进。的主要结果 在研究中, 伴随着对未来的研究提出了一些建议, 总结在如下:

1. 因为成对和成列参数估计是在简单处理不完整的结构评估数据, 他们可能会产生问题的后续 地震易损性评估。更具体地, 成对的 方式可能难以在满足有关正半定的标准, 而完全排除方法似乎是无能在考虑到附加信息损失和非信息所定义的概率。

2. 另一方面, 这表现的例子结合了线性和非线性迟滞系统数字合成和实际记录的地震地面加速度, 嵌入式建议 EM 算法补救似乎能够表现出优异的性能当只有不完整的结构鉴定数据可对于地震的脆弱性的评价。另外, 在精心设计参数的研究显示, 在一定程度, 对值的补救措施的鲁棒性相关的相关性和丢失概率。

3. 实施相当多的精力来计算的脆弱性值的非线性迟滞系统比对于线性系统是明智的。因此, 建议对于一些代理模型来建立未来的研究缓解其他繁琐的计算负担尤其是当在建议的补救措施的表现非线性迟滞系统的脆弱性评估为更全面地进行调查。

4. 除了对线性或非线性滞回的应用在这项研究中包括的系统, 制定补救方法也有助于地震安全的潜在可持续土木结构设计。事实上, 这种先进的在线监测技术和无线传感器网络辅助结构评估可以帮助获得体面的准确性在一个结构的状态的最新信息容易发生地震的危险。这些技术形成第一水平对可持续发展战略: 只要他们适当的工作有效的, 结构的抗震安全健康状况正在参加的是在它的使用寿命。对第一级策略主要介绍二级可持续发展战略, 制定补救措施可能希望在地震建立安全设计的准备来应付的情况只有不完整的结构鉴定数据实际上是效用。

9. 符号

以下是本文中使用的符号:

C = 阻尼矩阵; K = 刚度矩阵; \tilde{K} = 对于滞回系统辅助的刚度矩阵;

K' = 刚度随机向量; K'_r = 实现 K' ;

M = 从 ${}^c q$ 构造引导样本数, 又名从 ${}^i q$ 构造引导样本数; M = 质量矩阵;

M_0 = 他们的假设检验, 在检验数量零假设不能在指定的拒绝显著性水平;

m = 鉴定结构资料 K'_r 样本大小; $m_1 = {}^c q$ 和 ${}^i q$ 的样本大小;

$m_0 = \hat{\theta}_i$ 和 $\hat{i}\theta_i$ 的样本大小; $m_2 = {}^c q_i^*$ 和 ${}^i q_i^*$ 的样本大小;

$n = K'$ 的尺寸; $n_0 = K'$ 分布参数的数目;

P = 概率测度地震脆性的定义; p = 丢失概率;

${}^c Q$ = 潜在的人口对应于样品 ${}^c q$; ${}^i Q$ = 潜在的人口对应于样品 ${}^i q$;

${}^c Q_i^*$ = 潜在的人口对应于样品 ${}^c q_i^*$; q = 地震易损性;

${}^i q$ = 在数据不完整的地震易损性样品;

${}^c q$ = 在完成数据的情况下地震易损性样品;

${}^c q_i^*$ = 用 bootstrap 样本构造 ${}^c q$; R_a = 接受率;

S = 对于地震易损性定义样本空间; T = 最大的时间考虑;

t = 时间; $U(t)$ = 位移时程的随机向量;
 u_m = 预选阈值位移; $V(t)$ = 辅助功能未知的滞后系统;
 $X(t)$ = 地震地面加速度随机向量; α = 水平显著性;
 γ = 屈服前后刚度比; δ = 当发生屈服变形;
 η = 伪谱加速度; θ = 为 K' 分布参数;
 $\hat{\theta} = \theta$ 预估/预测; $\hat{\theta}_i$ = 在不完全数据的输入估计与情景;
 λ = 参数量化之间的拉伸的区别和抗压强度有关;
 ξ = 地面峰值加速度;

10. 参考文献

- 美国钢结构协会 (AISC)。2010。“规范钢结构建筑。”ANSI/AISC 360-10, 芝加哥
- 美国混凝土协会 (ACI)。2011。“建筑规范要求混凝土结构和评论。”ACI 318-11, 法明顿山, MI。
- ASTM。2008。“回弹指数的标准试验方法硬化混凝土。”美国 ASTM c805 / c805m-08, 西康舍霍肯, 宾夕法尼亚州
- ASTM。2009。“计算样本大小的估计标准的实践, 与指定的精度, 平均为大量的特性或过程。”ASTM e122-09, 西康舍霍肯, 宾夕法尼亚州
- 英国标准协会 (BSI)。2004。“欧洲规范2: 设计混凝土结构第1部分: 一般规则和建筑规则。”BS EN 1992-1-1:2004, 伦敦。
- 英国标准协会 (BSI)。2005。“欧洲规范3: 钢结构设计结构第1部分: 一般规则和建筑规则 BS EN。”1993-1-1:2005, 伦敦。
- 英国标准协会 (BSI)。2007。“现场综合评价建筑物和预铸混凝土构件强度 BS EN。”13791:2007, 伦敦。
- casciati, F., cimellaro, G.P., 和 domaneschi, M. (2008)。“地震斜拉桥的改造与滞回装置的可靠性。”计算机。结构。86 (17, 18, 1781, 1769 - -)
- 西里克, 奥委会, 和埃林伍德, B. (2010)。“地震的脆弱性非韧性钢筋混凝土框架结构的任意的和认知的的作用结构不确定性。”SAF., 32 (1), 1 - 12。
- 昌, F-K (2011), 主编。处理。第八国际研讨会, 结构健康监测, destech 出版物, 宾夕法尼亚州

Choe, D - E, 加尔多, P., rosowsky, D, 和豪卡斯, T (2008)。“钢筋混凝土概率容量模型和地震易损性估计受腐蚀柱的可靠。”。工程系统。SAF., 93 (3), 383 - 393。

cimellaro, G.P., 和 reinhorn, 点。(2011)。“多维性能灾害脆弱性功能极限状态。” J. 工程机械, 47 - 60. cimellaro, G.P., 卢武铉, H., 和斯蒂法诺, A. (2009)。“光谱和脆弱性评估通过强度折减和改型结构增强的阻尼。”地震工程振动., 8 (1), 115 - 125。

R. W. Clough Penzien,,,, J. (1993)。结构动力学, 第二版, 麦格劳山, 纽约。Dempster, Laird, A. P., N.M., 和鲁宾, D。(1977)。“最大通过 EM 算法的不完整数据的可能性。” J. R. 统计 SOC. SER. B 方法., 39 (1), 1 - 38。

Efron, B, 和 Tibshirani, R. J. (1993)。为了引导介绍, 查普曼和霍尔, 纽约盖斯肯, P., Der Kiureghian, A., 和蒙泰罗, P (1998)。“贝叶斯混凝土的弹性模量的预测。” J. 结构。工程, 89 - 95。

哈桑, M., 比尔代, O, 和法, R (1995)。“超声测量在桥梁评估静载荷试验。”无损检测和信息, 28 (6), 331 - 337。

heitjan, D.F., 和巴苏, S (1996)。“识别”在随机缺失“完全随机缺失”。“我。统计, 50 (3), 207 - 213。

kafali, C, 和 grigoriu, M. (2007)。“地震易损性分析: 简单的线性和非线性系统中的应用。”地震工程结构。达因., 36 (13), 1885 - 1900。

基姆, S. H., 和筱, M. (2004)。“发展的脆弱性曲线桥梁加固柱护套可能。”。工程机械, 19 (1 - 。2), 105 - 112。

leshchinsky, 点。(1992)。“混凝土强度无损检测: 统计控制。”母校。结构., 25 (2), 70 - 78。

lupoi, G., 弗兰金, P., lupoi, A., 平托, 体育 (2006)。“地震结构系统的脆弱性分析。” J. 工程机械, 385 - 395。

梅斯, 硕士 (2002)。“更新的性能和可靠性的混凝土使用离散的经验 Bayes 方法的结构。” J. 海上机械。英国。工程, 124 (4), 239 - 244。

孟, X - L., 范迪克, D. (1997)。“EM 算法的一个老民歌唱快新曲子。” J. R. 统计系统。SER. B 方法。59 (3), 511 - 567。

mostaghel, N (1999)。“捏的分析描述, 降解滞回系统。” J. 工程机械., 125 (2), 216 - 224. mostaghel, N, 和伯德, R.A. (2000)。“分层次分析的描述双线性迟滞系统。” J. 工程机械., 126 (6), 588 - 598。

规范：缺失值的多元正态数据分析[软件]。A. 发，J. L. 谢弗，大学园区，PA
控制器，美国，和双（2006），A. H.。“弯矩-曲率的损伤模型在地震荷载作用下的桥梁设计。”方法应用。机械工程，195（33 - 36），4490 - 4511。

公园，J.，towashiraporn，体育，克雷格，J. I.，和古德诺，B. J.（2009）。
“地震低层无筋砌体结构易损性分析研究。”结构。，31（1），125 - 137。

pascale，G.，Di Leo，A.，和博诺拉，V（2003）。“非破坏性评估高强混凝土的实际强度。”J. 母校。文明工程，15（5），452 - 459。

R：一个统计计算语言和环境。【计算机软件】。R发展的核心团队，为研发基础统计计算，维也纳，奥地利。萨珊，M，和Der Kiureghian，A（2001）。“钢筋混凝土结构地震易损性墙壁：“J结构位移的方法。工程，127（2），219 - 228。

澳大利亚标准。1998。“钢结构”。为4100-1998，悉尼，新南威尔士州，澳大利亚。澳大利亚标准。2009。“混凝土结构”。为3600-2009，悉尼，新南威尔士州，澳大利亚。沙利文，P. J. E.（1991）。“检测和混凝土强度评定 ACI 材料结构。J.，88（5），530 - 535。

王，诉 Z.，马利特，M，和修道院，A（2011）。“地震敏感性框架来评价数据剪切的多层脆弱性评价遗失。”过程。2011世界的发展，结构大会工程力学，科技出版社，大田，韩国，188 - 195。

吴，C. F. J.（1983）。“EM算法的收敛性。”安。统计，11（1），95 - 103。

