

第四届粤港澳地震科技研讨会，2010年1月7-8日，香港

4th Guangdong-Hong Kong-Macau Seminars on Earthquake Science and Technology

January 7-8 2010, Hong Kong

## 地震波选择方法，工具，及其在基于性能的抗震设计中的应用

王 刚

香港科技大学土木及环境工程学系

### 摘 要

在基于性能的土木工程抗震设计中，地震波是影响系统反应不确定性的最重要的因素之一。因此，研究一种系统的方法和工具，以便从现有的地震数据库中选择适当的地震波以代表设计地震的重要特征，便显得至关重要。由美国太平洋地震研究中心和加州地质勘探局联合赞助，DGML 项目开发了一个地震波选择系统，以便提供地震加速度用于各种工程的抗震设计。

DGML带有PEER-NGA强震数据库及用户交互图形界面，它能够根据各种设定的准则，搜索相应的地震记录，包括（1）设定的地震特性，如，震级，断裂机制，距离，和场地情况等；（2）地震波的反应谱与设计地震反应谱的对比；以及（3）其他的特性，如是否包含近场地震速度脉冲等。DGML应用于实际的工程抗震设计，显示出优良的性能。

# **Design Ground Motion Library and Its Application in Performance-based Earthquake Design of Civil Infrastructure**

Gang Wang

Department of Civil and Environmental Engineering  
Hong Kong University of Science and Technology

## **ABSTRACT**

In performance-based seismic design of civil infrastructure, earthquake ground motion is one of the primary sources of uncertainty in assessing the seismic performance of the civil system. It is critical to develop systematic methods and useful tools to select and modify from current ground motion databases to provide a small group of earthquake motions that can realistically represent important aspects of the design motion that control the nonlinear response of civil engineering facilities. Sponsored by Pacific Earthquake Engineering Research Center and California Geological Survey, the Design Ground Motion Library (DGML) project creates an electronic library of recorded ground motion acceleration time histories suitable for use by engineering practitioners for time history dynamic analyses of various facility types.

DGML is a ground motion selection and modification system equipped with PEER-NGA strong motion database and interactive graphic user interface. The DGML has the broad capability of searching for time history record sets in the according to various selection criterion, including (1) the characteristics of the recordings in terms of earthquake magnitude and type of faulting, distance, and site characteristics, (2) the response spectral shape of the records in comparison to design or target response spectra, and (3) other record characteristics including duration and the presence of velocity pulses in near-fault time histories. DGML has demonstrated excellent capacity in engineering design practice.

## 1. 引言

近年来，基于性能的地震设计在地震防灾减灾，保护生命财产安全方面起到越来越大的作用。由于地震波是影响系统反应不确定性的最重要的因素之一，因此，选择适当的地震波用于分析与设计成为抗震设计的重要课题。由美国太平洋地震研究中心（PEER）和加州地质勘探局（CGS）联合赞助，DGML（Design Ground Motion Library）研究项目的目的是建立一个动态交互式地震波选择系统，以便提供代表设计地震的加速度时程用于各种工程的抗震设计。

DGML 软件用 Matlab 图形界面开发而成，并被编译成不依赖 Matlab 环境而独立运行的程序。DGML 使用 PEER-NGA 研究项目（太平洋地震中心下一代地震衰减模型）新一代强震数据库，能根据用户设定的地震特性和准则来选择符合目标反应谱形状的地震波。

DGML 项目最初的概念是建立一个按震级大小，断层类型，距离范围，场地情况，和若干周期范围划分成若干子库的“静态”数据库。2006，2007 年太平洋地震中心地震波选择和修改研讨会（COSMOS 2006，2007）的研究进展表明，地震波的选择必须考虑同时考虑地震的特性和结构非线性反应的特性。因此，地震波选择系统应给予设计和分析人员充分的自由度，而 DGML 相应开发成一个“动态”的地震波数据库管理系统。

DGML 提供用户友好的图形界面方便数据输入和操作。操作结果能够实时的图形化显示出来。DGML 给用户充分的自由度来使用不同的选择准则。DGML 能够根据各种准则，搜索相应的地震记录，包括（1）设定的地震特性，如，震级，断裂机制，距离，场地情况，时程长短等；（2）地震波的反应谱与设计地震反应谱的对比；以及（3）是否包含近场地震速度脉冲，是否对波幅进行比例缩放等其他选项。

## 2. DGML 地震波数据库

DGML 所使用的地震数据库是基于 PEER-NGA 研究项目的新一代强震数据库，（参见 <http://peer.berkeley.edu/nga/>）。该强震数据库为太平洋地震中心，美国国家

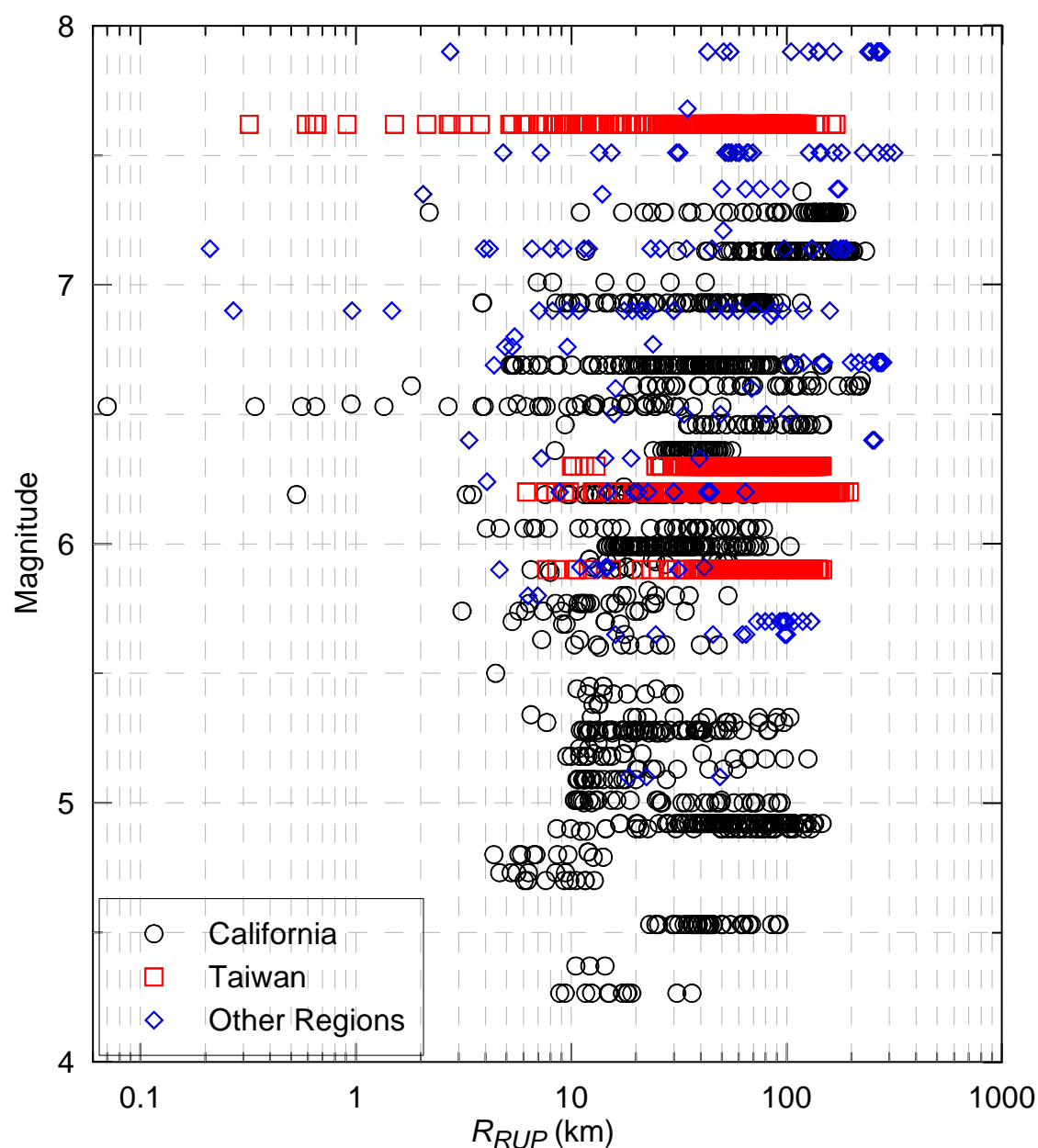
地质勘探局 (USGS)，南加州地震中心联合开发的下一代地动衰减模型 (NGA) 所用的数据库。该数据库来源于加州地质勘探局强震观测项目 (CGS-CSMIP) 和美国国家地质勘探局的可靠观测资料，并包含一些其他国家和地区的地震记录。该数据库共包含 173 次地震，涉及 1456 个地震台，共 3551 套三个方向的地震波加速度时程。根据断层走向资料，PEER-NGA 地震记录进一步正交转换到平行于断层 (FP, Fault Parallel) 和垂直于断层 (FN, Fault Normal) 两个方向。对比原数据库，正交转换后的地震波提供了更多关于震源的信息。例如，垂直于断层方向的地震波往往含有近断层强震速度脉冲，与断裂方向性效应直接相关。

经过详细的鉴别整理，DGML 地震波数据库共收录 3182 套三向 (FP, FN, 和竖向) 地震记录。没有收录的地震记录主要为以下几种类型：(1) DGML 数据库只保留浅层活动地块地震波，因而不收录其他地质环境 (例如潜没带) 下的地震记录。(2) 剔除非自由场的地震记录，比如在坝顶，在高层/重型楼房的地下室及地面等记录点所观测到的数据。(3) 不收录缺乏现场土层及地质资料的地震波；(4) 不收录只有一个水平方向记录的地震波；(5) 由于缺乏记录传感器方向或断层走向，而无法把地震原测记录转换到平行于断层 (FP) 和垂直于断层 (FN) 两个方向的地震波；(6) 其他一些不能公开的地震记录，或不可靠的地震记录，或重复的地震记录，等等。图一显示 DGML 所使用的地震波数据库的震级和距离分布。

DGML 数据库每条地震记录都有详尽的信息数据，包括震源基本信息，从震源到记录台的传播路径，和记录台的场地状况。每个地震波在数据库中都有唯一的编号和大量的相关信息，包括：地震名称，年份，震级，断层类型，从震源到记录台的最短距离的度量数据 (如，到断裂面的最短距离，及 Joyner-Boore 距离等)，记录台的名称，场地地下 30 米平均剪切波速度 ( $V_{s30}$ )，等等。

除此之外，DGML 表征地震波特性的定量参数还包括：加速度反应谱，峰值加速度 (PGA)，峰值速度 (PGV)，峰值位移 (PGD)，地震波有效持时 (significant duration)，推荐使用的最小可用频率 (即最长可用周期)，有无强速度脉冲等。其中，地震波有效持时是表征地震能量的一个标量，是地震加速度时程累积 5%-95% 阿里亚斯烈度 (Arias Intensity) 所历经的时间。有效持时的长短可能会对结构动力反

应有重要的影响，是选择地震波应考量的重要特征。每个地震波记录有推荐使用的最小可用频率，对应于反应谱的最长可用周期。地震波后处理的滤波过程中去掉了短频（长周期）噪音，而滤波导致了地震波波幅和能量在低于该值的频率范围内减小。因此，在那些频率范围内，后处理过的地震波不能代表真实的地震。我们建议，与结构反应相关的频率范围要尽量在选取的地震波的可用频率范围内。



图一：DGML 所使用的地震波数据库震级和距离分布

大量研究表明，通常出现在近场地震波时程中的强速度脉冲对结构可能产生严重的损害（参见 Bertero *et al.* 1978; Anderson and Bertero 1987; Hall *et al.* 1995; Iwan 1997; Makris and Black 2003; Luco and Cornell 2006; Baker and Cornell 2008）。因此，DGML 提供了搜索强速度脉冲地震波的功能。强速度脉冲地震波可能与断层断裂的方向性效应相关。如前所述，DGML 地震波数据库已经正交转化到垂直于断层走向（FN）和平行于断层走向（FP）的两个方向。早前的研究（Somerville 等 1997）表明，强脉冲多发生在垂直断层的方向，而较少发生于平行断层的方向。DGML 对速度脉冲波的认定和特性分析主要参考 Baker (2007) 的研究结果。Baker 分析了 PEER-NGA 数据库中的所有记录，采用小波分析的方法确认出具有强速度脉冲特性的 FN 方向的地震波。他提出的确定速度脉冲的一般准则为：（1）单脉冲对比波程的其他部分足够显著；（2）此脉冲在地震历程早期达到，符合断层断裂方向性效应的特征；（3）此脉冲具有足够大的绝对速度幅值（峰值速度需大于等于 30 厘米/秒）。值得指出的是，在缺乏更详尽的地震学资料的前提下，我们不能保证 Baker 所确定的脉冲波都是由于断裂方向性效应引起的。虽然引起这些脉冲波的机理尚不完全清楚，这些脉冲波和方向效应引起的脉冲波相似，可以用来模拟方向脉冲对结构的影响。

Somerville (2003), Mavroeidis 和 Papageorgious (2003), Bray 和 Rodriguez-Marek (2004), Fu 和 Menon (2004) 等人也提出过近场地震记录中含有强脉冲的列表。因此，我们在 Baker 研究的基础上，根据上述几人的研究结果补充了一些新的脉冲地震波。新确定的脉冲波需满足以下两个条件：（1）峰值速度大于等于 30cm/sec；（2）新增加的脉冲波至少被以上两个研究组所共同确认过。DGML 最终确定的脉冲地震波为：60 条只沿 FN 方向的脉冲波；19 条只沿 FP 方向的脉冲波；30 条同时具有 FN, FP 方向的脉冲波。我们发现，大多数脉冲纪录位于震源 20 公里范围内，更多的是位于震源 10 公里的范围内，只有非常少的脉冲波发生在距震源 30 公里之外的地方。

根据以上研究，我们也给出了每个脉冲波的脉冲周期的估算数据。据一般趋势，脉冲周期随着震级的增大而增大，这是与断层破裂机制相符的。对较大震级的地震，断层类型对脉冲波周期有较大的影响，虽然目前具体的影响程度尚不完全清楚。因

此，对高于 6.5 级的地震，我们建议来自滑移断层的地震记录不要用在逆冲断层和正断层情形中，反之亦然。DGML 数据库中仅有极少数的正断层和走向滑移断层的脉冲波记录。在此情况下，可以把逆断层的记录用在正断层和走向滑移断层的情形中。用户可以通过选择项来细化地震脉冲波搜索，如，DGML 可搜索 FN 方向脉冲波，FP 方向脉冲波，FN 和 FP 方向同时具有的脉冲波。为了更好地研究脉冲波在时程上的细节，DGML 显示每个脉冲波的速度时程曲线，

### 3. 地震波选择与修改的基本步骤

大量研究表明，地震反应谱在某些周期范围内的形状与结构的非线性反应直接关联（参见 Shome et al. 1998; Cordova et al. 2001; Luco and Cornell 2006; Baker and Cornell 2005, 2006, 2008; GSM Working Group, 2009）。DGML 地震波选择的主要基于加速度反应谱。地震波选择与修改分以下三个步骤：（1）设定目标地震反应谱；（2）设定搜索地震记录的限制条件和准则；（3）搜索，选择，并评估地震记录。

#### （1）设定目标地震的反应谱

DGML 提供了三种方法来设定目标地震反应谱。方法 1，根据现行规范制定反应谱。在此选项下，目标反应谱为 NEHRP (BSSC 2003)，ASCE/SEI 7-05 (ASCE 2006)，和 International Building Code (ICC 2006) 所规定的最大容许地震反应谱。规范地震反应谱可以用三个参数完全确定： $S_{D_s}$ ，根据场地分类确定的周期为 0.2 秒的反应谱加速度； $S_{D_1}$ ，根据场地分类确定的周期为 1 秒的反应谱加速度； $T_L$ ，从常速度反应谱（谱加速度与  $1/T$  成正比）到常位移反应谱（谱加速度与  $1/T^2$  成正比）的转化周期。用户只需输入此三个参数，即可得到符合规范的目标反应谱。方法 2：用户自定义的反应谱。在此选项下，用户只需输入周期和反应谱值的列表，便可以构造用户需要的反应谱。方法 3：PEER-NGA 反应谱。DGML 采用 NGA 研究项目所开发的五种浅层活跃地块地动衰减模型（Abrahamson and Silva 2008; Boore and Atkinson 2008; Campbell and Bozorgnia 2008; Chiou and Youngs 2008a; Idriss 2008）来构造确定性的境况地震。使用者只需要输入基本的地动衰减模型参数，比如，矩震级，断层

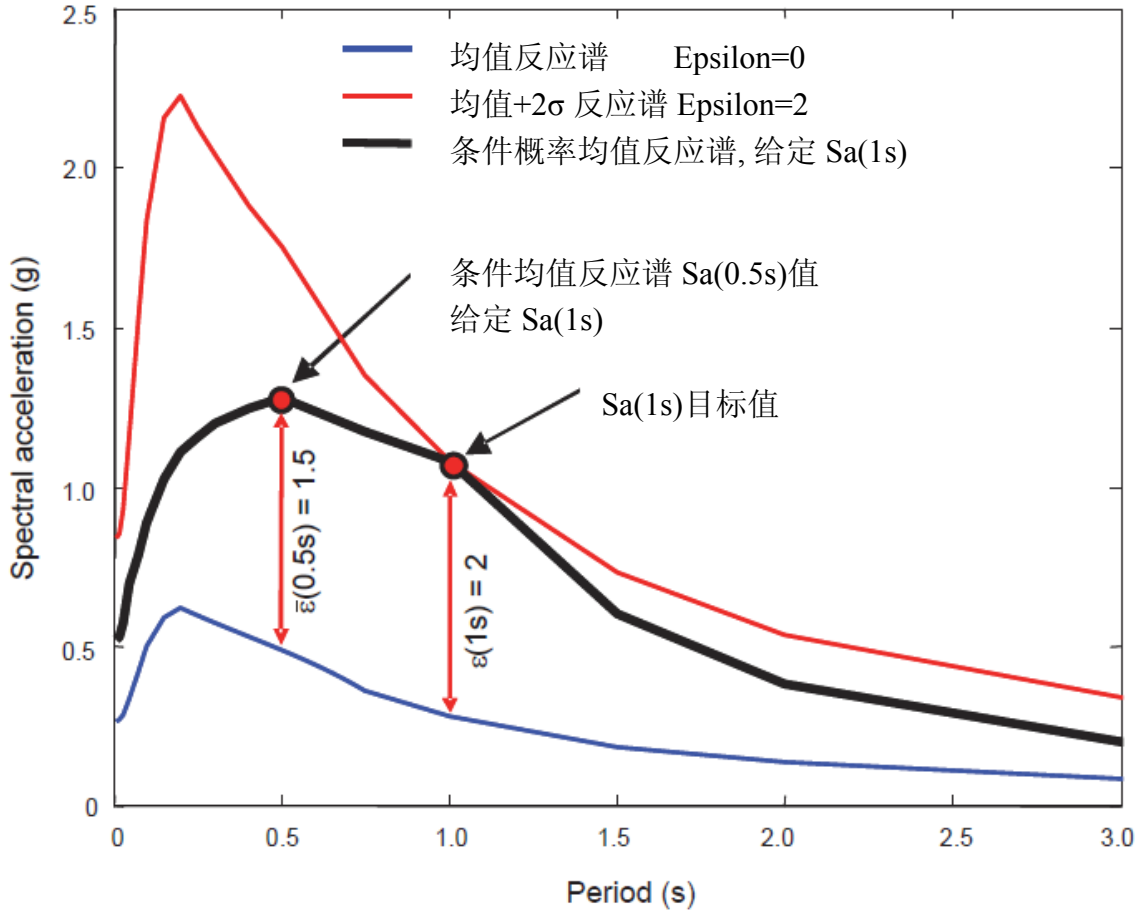
类型，断层-场地距离， $V_{s30}$  等，DGML 可以根据所选择的地质种衰减模型自动计算出相应的加速度反应谱。值得注意的是，Idriss 模型目前限定  $V_{s30}$  大于等于 450 m/sec，即该模型只适用于硬土和岩石场地。

基于概率的地震灾害分析往往采用均布灾害度反应谱 (Uniform Hazard Spectrum, UHS) 作为设计地震反应谱。最新研究结果表明，直接用 UHS 作目标反应谱来选择地震波将使设计过于保守。美国斯坦福大学 Cornell 教授 (2006) 所指出，均布灾害度反应谱是基于概率灾害分析得出的，它仅仅表示不同周期的加速度谱值具有相同的概率，并非来源于某个实际的地震境况。在不同周期上，均布灾害反应谱可以由不同地震境况所确定的。因此，均布灾害度反应谱的形状相比某一个实际可能的地震反应谱而言太过于广谱，直接作为目标反应谱用于设计将过于保守。我们可以进行灾害分解来确定主导地震源和地震境况，然后构造符合“均布灾害度反应谱”水平的“条件概率均值反应谱” (Baker and Cornell 2006)。

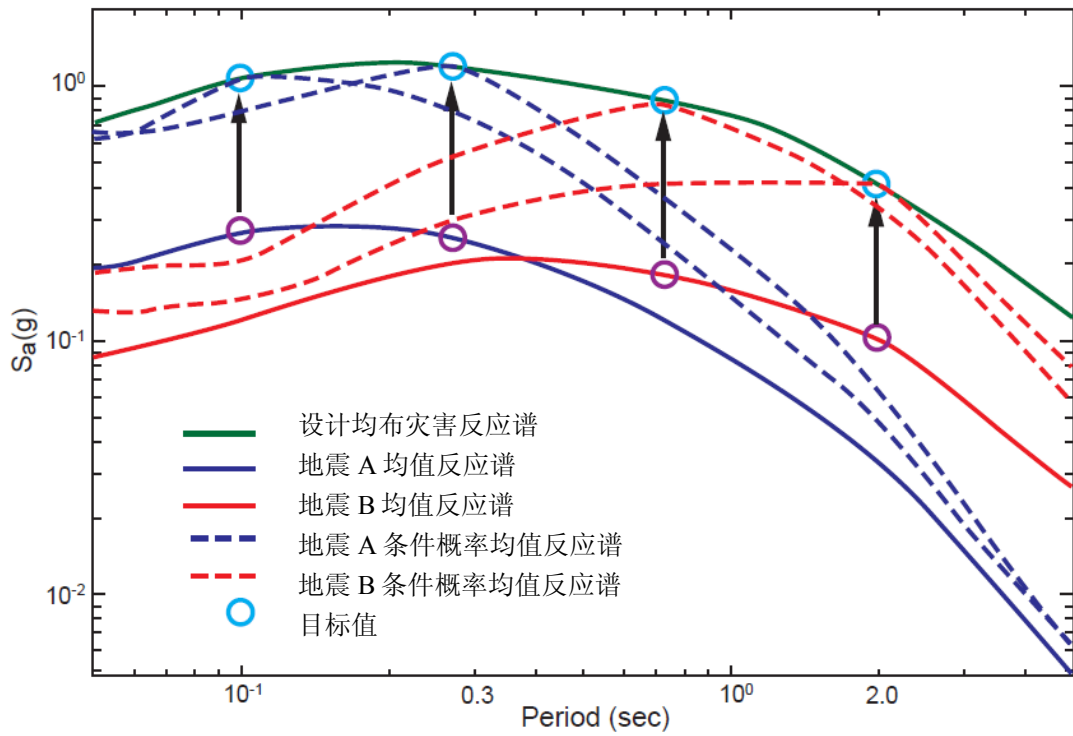
图二显示“条件概率均值反应谱” (Conditional Mean Spectrum) 的基本概念。根据条件概率分析，“条件概率均值反应谱”给出了通过某设定周期及其反应谱值的所有反应谱的平均形状。若在某个给定周期的反应谱值具有给定的 Epsilon 个标准方差数，在其他周期上的标准方差数则小于此 Epsilon。其中，Epsilon 被定义为大于或者小于均值反应谱坐标的标准方差数。图二所示，给定目标反应谱在周期 1 秒具有 Epsilon=2 水平的目标值。在其他周期范围，“条件概率均值反应谱”低于均值+2 $\sigma$  反应谱。“条件概率均值反应谱”反映了在不同周期下反应谱不完全相关性。简而言之，如果某个极小概率的大的反应谱值在某个周期出现，同样高的谱值便不太可能在其他周期出现。基于这种概念，“设计均布灾害度反应谱”在不同周期上的目标值，可以由一组不同地震境况下的“条件概率均值反应谱”来表征，如图三所示。“条件概率均值反应谱”作为目标反应谱，具有更窄的谱带宽和更合理的形状。因此，DGML 可以自动生成 PEER-NGA 模型的“条件概率均值反应谱”。

图四显示了 DGML 搜索引擎的图形界面。通过此界面，用户可以使用以上阐述的方法生成所需要的目标反应谱。所生成的目标反应谱用来进行下一步地震记录的搜索和匹配。





图二：条件概率均值反应谱示意图



图三：在不同周期用不同境况地震构造“条件概率均值反应谱”示意图

## (2) 设定搜索地震记录的限制条件和准则

DGML 最基本的准则是所选地震波反应谱的形状应同目标反应谱在设定的周期范围内“匹配”。反应谱匹配的周期范围需要根据结构分析的特点而选定。我们的研究表明，与结构反应密切相关的反应谱周期范围应包括小于结构基本周期（一阶振型周期）的范围（考虑结构高阶振型的影响），以及大于结构基本周期的范围（考虑到结构非线性反应中的软化效应，即结构反应周期变长）。我们建议周期范围至少要包含从三阶振型周期到 2-3 倍一阶振型周期的范围。

为了使记录反应谱在总体上与目标反应谱的形状相似，在某些情况下，需要对现有的地震时程记录进行适当的修改。由于 DGML 强调选取的地震波尽量保持原有的特点，因此 DGML 仅对地震波波幅进行“简单比例缩放”。即，对波幅进行比例放大或者缩小，以便更好的匹配目标反应谱。值得指出的是，“简单比例缩放”并不改变记录的频域特性。DGML 提供三种比例缩放的方法：1，放大或缩小波幅，以便在设定周期范围内最小化均方差。此方法能让地震记录反应谱的形状在总体上最接近于目标反应谱的形状。2，放大或缩小波幅，以便使地震记录反应谱在某个设定的周期值上与目标反应谱值相同。3，保持原始数据，不做任何修改。用户可以自行选择任意一种方法。

我们用均方差 ( $MSE$ ) 来量化地震记录的反应谱与目标反应谱的“匹配”程度。 $MSE$  量度在对数周期和对数反应谱坐标系中记录反应谱 (record) 与目标反应谱 (target) 之间的差异，从而最匹配的地震波具有最小的均方差。反应谱周期在对数坐标下从 0.01 秒到 10 秒划分为均匀分布的离散点。DGML 中，每个对数周期循环划分为 100 个离散点。因此，0.01 秒到 10 秒（含端点）共分为 301 个离散点。假设目标反应谱和记录反应谱在每个离散周期点  $T_i$  的插值分别为  $Sa^{target}(T_i)$  和  $Sa^{record}(T_i)$ ， $MSE$  据以下公式计算：

$$MSE = \frac{\sum_i w(T_i) [\ln Sa^{target}(T_i) - \ln(f Sa^{record}(T_i))]^2}{\sum_i w(T_i)} \quad (1)$$

其中，参数  $f$  是线性波幅比例系数，作用于记录反应谱的所有周期上。参数  $w(T_i)$

是权重系数，以便对不同的周期设定不同的相对权重，使“匹配”的度量具有更大的灵活性。DGML 允许设定任意权重系数。其中，最简单的情况是在所有周期设相同的权重。也可以用权重系数方程加强在某个周期段上反应谱的匹配度，而在更广的周期段上仍保持总体相对不错的匹配度。

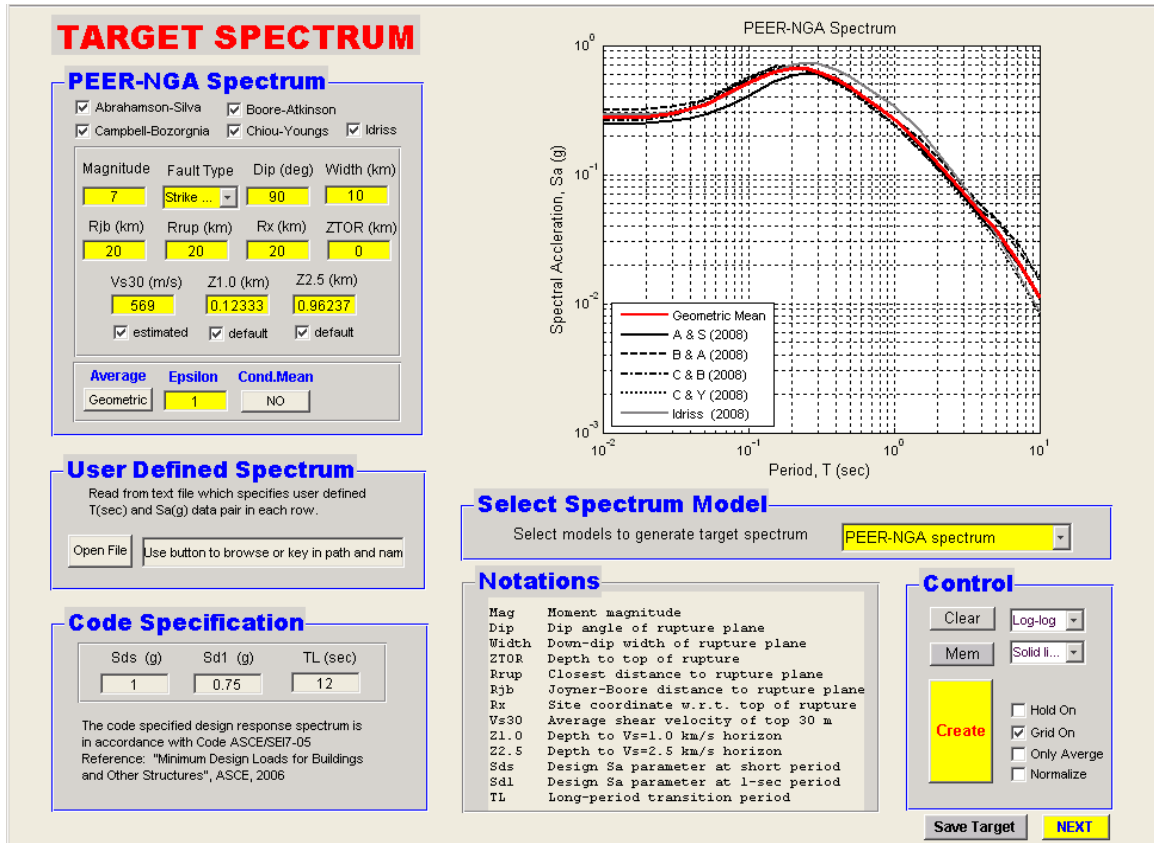
为了与目标反应谱最优匹配，比例系数  $f$  可根据最小化  $MSE$  公式(1) 而确定：

$$\ln f = \frac{\sum_i w(T_i) \ln \left( \frac{Sa^{target}(T_i)}{Sa^{record}(T_i)} \right)}{\sum_i w(T_i)} \quad (2)$$

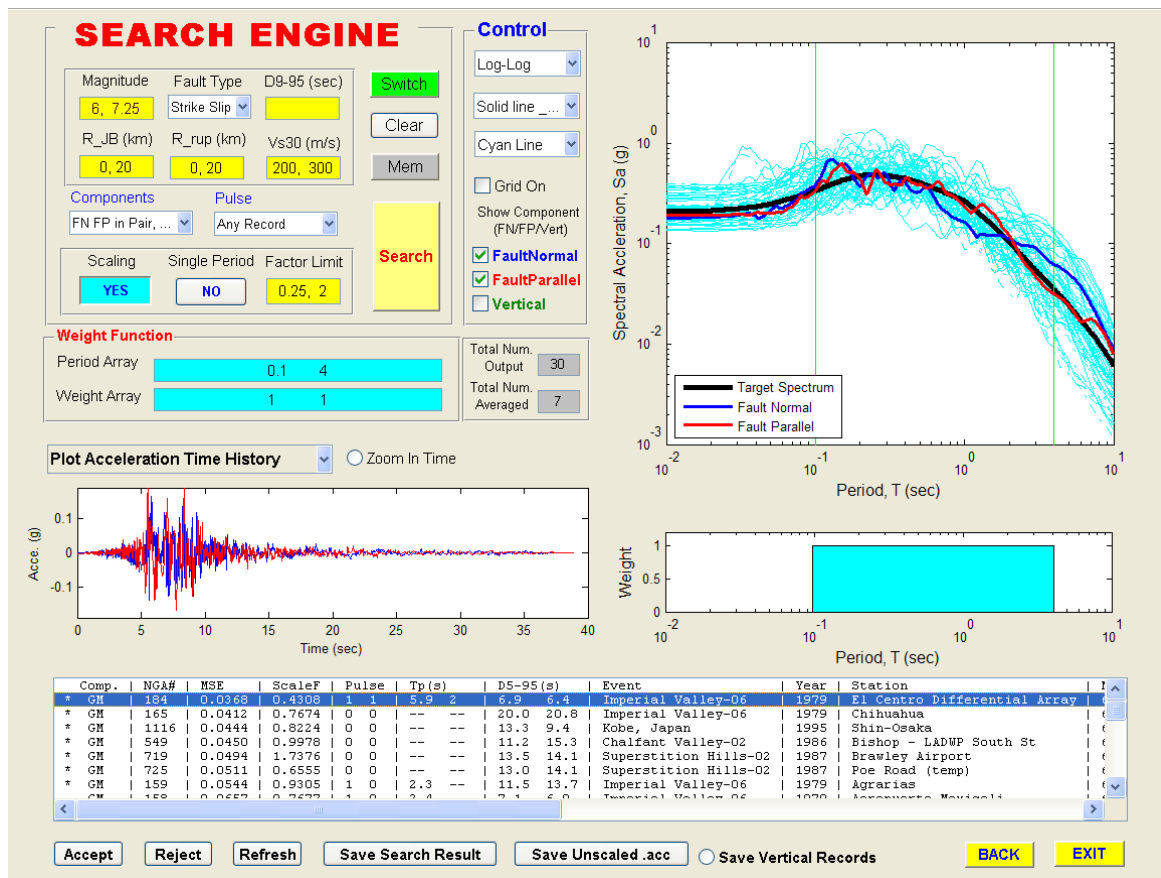
### (3) 搜索，选择，并评估地震记录

图五显示了 DGML 搜索引擎的图形界面。搜索引擎可以设定搜索参数及搜索限制条件，包括：地震震级 (Magnitude)；断层类型 (Fault Type)；距离范围 (R\_JB, R\_rup)； $V_{s30}$  范围；有效持时 (D5-95)；是否包含有或不含有脉冲纪录 (pulse)；地震波分量 (Components, 所选项包括：任意方向，沿垂直断层方向，沿平行断层方向，垂直和平行断层两个方向的一对地震波)；比例系数  $f$  的范围限定 (Factor Limit)；DGML 还可以设定权重函数和需要的比例算法，计算每个地震纪录的匹配均方差 ( $MSE$ ) 并按  $MSE$  升序将结果排列。

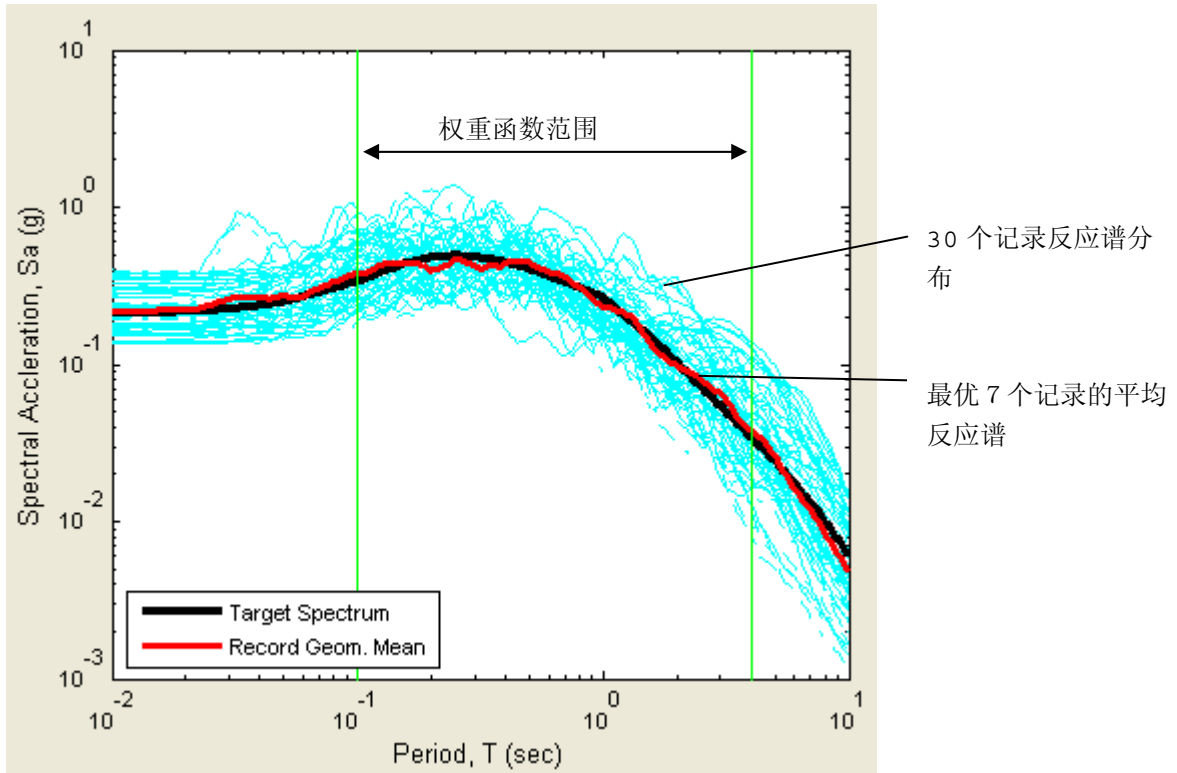
DGML 提供快速查看、评估各个地震记录的实用性功能，包括目标反应谱，记录反应谱的图形显示，加速度 / 速度 / 位移时程的显示，以及详细的地震波数据信息列表。图六 (a) 显示了目标反应谱，平均反应谱，及记录反应谱的分布实例。从图中可以看出，DGML 所选择出的七条反应谱的平均曲线，能很好的近似目标反应谱的形状。图六 (b) (c) 显示了其中某一条地震记录在 FN, FP 水平方向反应谱以及竖向反应谱曲线。DGML 还提供详细的搜索结果列表，见图六 (d)，以显示该记录的  $MSE$ ，比例系数 (ScaleF)，震级 (Mag.)，断层类型 (Mechanism)，距离 (Rjb, Rrup)， $V_{s30}$ ，最小可用频率 (Low Freq)，有效持时 (D5-95)，以及是否含有速度脉冲 (Pulse, Tp) 等信息。以上功能有助于综合评估每个地震波，并允许用户对搜索结果进行进一步调整，可以“接受”或“拒绝”某个地震记录，并存储搜索结果和加速度时程文件。



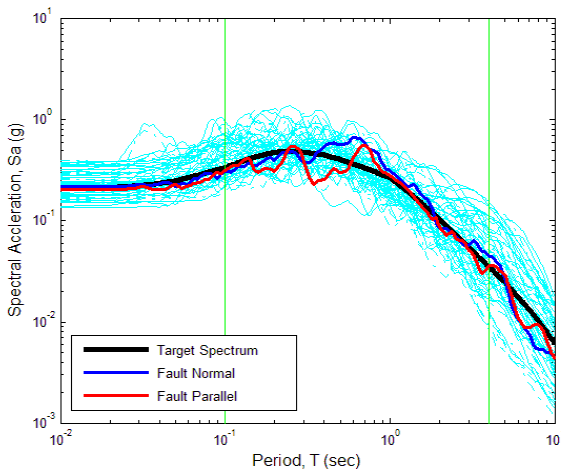
图四：DGML 目标反应谱图形界面



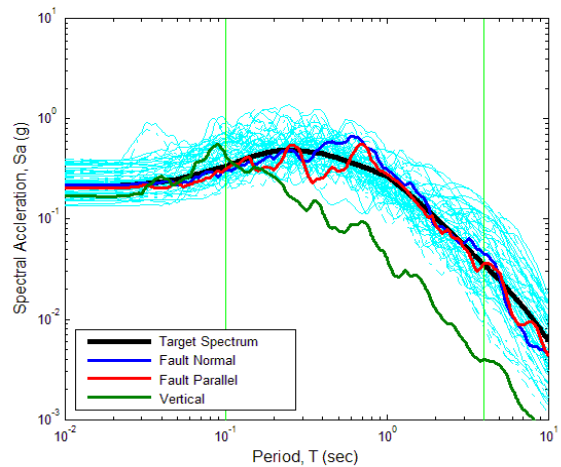
图五：DGML 搜索引擎图形界面



(a) 显示目标反应谱，平均反应谱，及记录反应谱分布



(b) 显示某条记录FN, FP水平方向反应谱



(c) 显示某条记录FN, FP, 垂直三方向反应谱

Comp.	NGA#	MSE	ScaleF	Pulse	TP (s)	D5-95 (s)	Event	Year	Station
* GM	184	0.0368	0.4308	1 1	5.9 2	6.9 6.4	Imperial Valley-06	1979	El Centro Differential Array
* GM	165	0.0412	0.7674	0 0	-- --	20.0 20.8	Imperial Valley-06	1979	Chihuahua
* GM	1116	0.0444	0.8224	0 0	-- --	13.3 9.4	Kobe, Japan	1995	Shin-Osaka
* GM	549	0.0450	0.9978	0 0	-- --	11.2 15.3	Chalfant Valley-02	1986	Bishop - LADWP South St
* GM	719	0.0494	1.7376	0 0	-- --	13.5 14.1	Superstition Hills-02	1987	Brawley Airport
* GM	725	0.0511	0.6555	0 0	-- --	13.0 14.1	Superstition Hills-02	1987	Poe Road (temp)
* GM	159	0.0544	0.9305	1 0	2.3	11.5 13.7	Imperial Valley-06	1979	AgFarias
* GM	158	0.0552	0.7272	1 0	2.4	7.1 6.0	Imperial Valley-06	1979	AgFarias

(d) 搜索结果列表

图六. DGML 搜索结果显示

## 4. 结论

DGML 是一个基于 PEER-NGA 数据库的地震波选择图形交互系统。它可以根据用户设定的参数和准则，搜索与目标反应谱最优匹配的地震波纪录。DGML 提供了灵活的地震波的选择参数，包括震级，断裂机制，距离，场地情况，有效持时，近场速度脉冲等。DGML 已经成功为多个工程项目的抗震设计提供加速度时程，显示出优良的性能。通过设定不同的搜索参数和准则，DGML 可以用来系统的研究地震波特性对结构反应的影响。

DGML 应用最新的 PEER-NGA 地震数据库，尤其适用于浅层活跃地块等地质环境。它也可以方便的扩展融汇其他地质环境下的地震数据，对在中国推行基于性能的抗震设计有重要的借鉴意义。为了达到这个目标，对现有的地震实测数据资料进行准确、系统地整理、编辑、汇总，便显得至关重要。

## 致 谢

DGML 研究项目由多名专家顾问组成，包括 Geomatrix 工程咨询公司 (Dr. Robert Youngs, Mr. Maurice Power, Dr. Zhihuan Li, Dr. Faiz Makdisi, Dr. Chih-Cheng Chin) ; Simpson Gumpertz & Heger, Inc. (Ronald Hamburger, Ronald Mayes) ; Parsons Brinckerhoff (Roupen Donikian); Quest Structures (Dr. Yusof Ghanaat) Pacific Engineering & Analysis (Dr. Walter Silva); URS Corporation (Dr. Paul Somerville); Earth Mechanics (Ignatius Po Lam); 斯坦福大学 (Allin Cornell 教授, Jack Baker 教授), 伯克利加州大学 (Stephen Mahin 教授)。本文作者为 DGML 的主要设计者。

本文作者感谢美国太平洋地震研究中心 (PEER), 加州地质勘探局 (CGS) 和香港大学教育资助委员会 DAG08/09. EG13 提供研究经费。

## 参考文献

- Abrahamson, N.A., and Silva, W.J., 2008, Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations: *Earthquake Spectra*, vol. 24, no. 1, pp. 67-97.
- Akcar, S., Yazgan, U., and Gulkan, P., 2005, Drift estimates in frame buildings subjected to near-fault ground motions: *Journal of Structural Engineering*, v. 131, no. 7, pp. 1014-1024.
- Alavi, B., and Krawinkler, H., 2001, Effects of near-fault ground motions on frame structures: Blume Center Report #138, Stanford, California, 301 pp.
- American Society of Civil Engineers (ASCE), 2006, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI 7-05.
- Anderson, J.C., and Bertero, V.V., 1987, Uncertainties in establishing design earthquakes: *Journal of Structural Engineering*, v. 113, no. 8, pp. 1709-1724.
- Baker, J.W., 2007, Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 97, no. 5, pp. 1486-1501.
- Baker, J.W., and Cornell C.A., 2005, A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon: *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, v. 34, no. 10, pp. 1193-1217.
- Baker, J.W., and Cornell, C.A., 2006, Spectral shape, epsilon and record selection: *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, v. 35, no. 9, pp. 1077-1095.
- Baker, J.W., and Cornell, C.A., 2008, Vector-valued intensity measures incorporating spectral shape for prediction of structural response: *Journal of Earthquake Engineering*, v. 12, Iss 4, pp. 534-554.
- Baker, J.W., and Jayaram, N., 2008, Correlation of spectral acceleration values from NGA ground motion models: *Earthquake Spectra*, vol. 24, no. 1, pp. 299-317.
- Bertero, V., Mahin S., and Herrera R., 1978, Aseismic design implications of near-fault San Fernando earthquake records: *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, v. 6, no. 1, pp. 31-42.
- Boore, D.M., and Atkinson, G.M., 2008, Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5% damped PSA at spectral periods between 0.01s and 10.0s: *Earthquake Spectra*, vol. 24, no. 1, pp. 99-138.
- Bray, J.D., and Rodriguez-Marek, A., 2004, Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 24, no. 11, pp. 815-828.
- Building Seismic Safety Council (BSSC), 2003, NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (FEMA 450), 2003 Edition.
- Campbell, K.W., and Bozorgnia, Y., 2008, NGA ground motion Model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD, and 5% damped linear elastic

- response spectra for periods ranging from 0.01s to 10.0s: *Earthquake Spectra*, vol. 24, no. 1, pp. 139-171.
- Chiou, B.S.J. and Youngs, R.R., 2008a, Chiou-Youngs NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters, *Earthquake Spectra*, vol. 24, no. 1, pp. 173-215.
- Consortium of Organizations of Strong Motion Systems (COSMOS), 2006, Annual Meeting Technical Session, An Evaluation of Methods for the Selection and Scaling of Ground Motion Time Histories for Building Code and Performance-Based Earthquake Engineering Applications, sponsored by COSMOS and Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) Berkeley, CA, November.
- Consortium of Organizations of Strong Motion Observation Systems (COSMOS), 2007, Annual Meeting Technical Session, Recommendations for Selection and Scaling of Ground Motion for Building Code and Performance-Based Earthquake Engineering (PBEE) Applications and on Evaluation of Selection and Scaling Procedures Proposed for the Next Generation of PBEE, sponsored by COSMOS and Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) Berkeley, CA, November.
- Cordova, P.P., Mehanny, S.S.F., Deierlein, G.G., and Cornell, C.A., 2000, Development of a two-parameter seismic intensity measure and probabilistic assessment procedure: Proceedings of the Second U.S.-Japan Workshop on Performance-Based Seismic Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures, Sapporo, Japan, pp. 195-214.
- Cornell, C.A., 2006, Should uniform hazard spectra be used for design? How should design response spectra be determined considering uniform hazard spectra from design maps and hazard deaggregation data?: Abstract and PowerPoint presentation in Preprints, Third ATC-35/USGS National Earthquake Ground Motion Mapping Workshop, San Mateo, California, December.
- Fu, Q., and Menun, C., 2004, Seismic-environment-based simulation of near-fault ground motions: Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, 15 pp.
- GMSM Working Group, 2009, C.B. Haselton (ed.), PEER Ground Motion Selection and Modification Working Group, Evaluation of ground motion selection and modification methods: predicting median interstory drift response of buildings: PEER Report 2009/01, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Hall, J.F., Heaton, T.H., Halling, M.W., and Wald, D.J., 1995, Near-source ground motion and its effects on flexible buildings: *Earthquake Spectra*, v. 11, no. 4, pp. 569-605.
- Idriss, I.M., 2008, An NGA empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes: *Earthquake Spectra*, vol. 24, no. 1, pp. 217-242.
- International Code Council (ICC), 2006, International Building Code 2006.



- Iwan, W.D., 1997, Drift spectrum: measure of demand for earthquake ground motions: *Journal of Structural Engineering*, v. 123, no. 4, pp. 397-404.
- Luco, N., and Cornell, C.A., 2006, Structure-specific scalar intensity measures for near-source and ordinary earthquake ground motions: *Earthquake Spectra*, v. 23, no. 2.
- Makris, N., and Black, C., 2003, Dimensional analysis of inelastic structures subjected to near fault ground motions: Earthquake Engineering Research Center, EERC 2003-05, Berkeley, California, 96 pp.
- Mavroeidis, G.P., and Papageorgiou, A.S., 2003, A mathematical representation of near-fault ground motions: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 93 no. 3, pp. 1099-1131.
- Shome, N., Cornell, C.A., Bazzurro, P., and Carballo, J.E., 1998, Earthquake records and nonlinear response: *Earthquake Spectra*, v. 14, no. 3, pp. 469-500.
- Somerville, P.G., Smith, N.F., Graves, R.W., and Abrahamson, N.A., 1997, Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity: *Seismological Research Letters*, v. 68, no. 1.