

مبانی پایه محاسبه قابلیت اعتماد لرزه‌ای سازه‌ها

علیرضا آذر بخت، دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله*

عبدالرضا سروقد مقدم، استادیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله**

کیارش ناصراسدی، دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

* تلفن: ۰۲۱-۲۸۳۱۱۱۶، پست الکترونیکی: azarbakht@dena.iiees.ac.ir

** تلفن: ۰۲۱-۲۸۳۱۱۱۶، پست الکترونیکی: moghadam@dena.iiees.ac.ir

چکیده

در چند سال اخیر تحقیقات بر روی مفاهیم عملکرد لرزه‌ای به نتایج قابل توجهی رسیده است و کارهای بسیاری انجام شده است. اما کماکان پایان راه بسیار دور بنظر می‌رسد. روش مورد بحث این مقاله توسط آقای کرنل و همکارانش در چند سال اخیر در دانشگاه استنفورد توسعه داده شده و در راهنمای FEMA 350,351 استفاده شده است که در این تحقیق سعی می‌شود علاوه بر ارائه مفاهیم پایه، به معرفی نحوه استفاده از این مفاهیم نیز اشاره شود.

کلیدواژه‌ها: تحلیل دینامیکی فزاینده، تقاضا، ظرفیت، سطوح عملکرد سازه‌ای

۱- مقدمه

در این مقاله به تشریح یک روش احتمالاتی خاص برای بیان مبانی طراحی لرزه‌ای ساختمانها می‌پردازیم. این روش براساس اهداف عملکرد سازه‌ای بنا شده است. در این روش سعی می‌شود که احتمال وقوع یک سطح عملکرد خاص برای سازه محاسبه شود. بر این اساس ظرفیت و تقاضای سازه بوسیله تغییر مکانهای دینامیکی غیرخطی سازه بیان می‌شوند و سپس با ترکیب احتمالاتی ایندو، احتمال وقوع فروریزش در سازه محاسبه میگردد. تمامی مراحل شامل در نظر گرفتن یک سری عدم قطعیت‌ها و پیشایی‌های موجود در حرکات قوی زمین، تقاضای سازه و ظرفیت سازه می‌باشند، که اهمیت برخورد احتمالاتی با موضوع را روشن تر می‌سازند.

۲- مفاهیم پایه

در این مبحث سه پارامتر در مسئله تعریف میشوند که بوسیله مفاهیم احتمالاتی آنها را بیان می‌کنیم: الف) شدت حرکت شدید زمین که معمولاً بوسیله سطحی از شتاب طیفی برای پریرود اصلی

سازه و ۵ درصد میرائی یا بیشتر بیان می‌شود و با $S_a(T_1, \zeta)$ نشان داده می‌شود. (ب) تقاضای تغییر مکان سازه (D) (ج) ظرفیت تغییر مکان سازه (C). فرض می‌شود که دو پارامتر C و D بوسیله بیشینه تغییر مکانهای نسبی بین طبقه‌ای ارایه می‌شوند و احتمال تغییرات سطوح مختلف حرکات قوی زمین در محل مورد مطالعه، بوسیله تابع خطر یا $H(sa)$ تعریف می‌شود که در حقیقت احتمال سالیانه مساوی و یا بیشتر بودن S_a در محل مورد مطالعه را از مقدار S_a بیان می‌کند که اغلب این توابع بوسیله زلزله شناسان برای محلهای مختلف و یا به صورت نقشه‌هائی محاسبه می‌شوند و پیش‌بینی تقاضای تغییر مکان برای هر سطح ویژه‌ای از حرکات قوی زمین و محاسبه ظرفیتها برای موده‌های خرابی مختلف جزء وظایف مهندسین سازه می‌باشد.

در این مقاله، هدف بیان مبانی اساسی و پایه‌ای برای پیش‌بینی احتمال مساوی یا بیشتر بودن وقوع عملکرد یک سازه از یک عملکرد خاص مورد نظر است. برای این منظور باید به سه پارامتر بیان شده در قبل برگردیم. ترکیب کردن این سه پارامتر در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول همبسته کردن دو پارامتر اول، یعنی پارامتر خطر و تقاضای بیشینه تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای، تا در نتیجه یک منحنی خطر بیشینه تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای یا $H_D(d)$ بدست آید، که بیانگر احتمال سالیانه بیشتر و یا مساوی شدن تقاضای D را از مقدار d بیان می‌کند. در مرحله دوم منحنی بدست آمده از مرحله اول را با پارامتر سوم (یعنی نماینده ظرفیت سازه) ترکیب می‌کنیم تا P_{PL} بدست آید که بیانگر احتمال سالیانه سطح عملکردی است که سازه تجربه نخواهد کرد و یا به عبارت دیگر، احتمال سالیانه فروریزش.

با این تفاسیر $H_D(d)$ را می‌توان در فرم گسسته خویش به صورت زیر بیان نمود:

$$H_D(d) = P[D \geq d] = \sum_{\text{all } x_i} P[D \geq d | S_a = x_i] P[S_a = x_i] \quad (1)$$

جمله اول بیانگر احتمال مساوی و یا بیشتر شدن تقاضای (D) از مقدار d به ازای یک $S_a = x_i$ مشخص می‌باشد. که بستگی به پاسخ سازه مورد نظر در این S_a مشخص دارد و جمله دوم احتمال وقوع S_a برابر x_i مورد نظر می‌باشد. رابطه (۱) را در حالت پیوسته می‌توان به صورت ذیل نوشت:

$$H_D(d) = \int P[D \geq d | S_a = x] dH(x) \quad (2)$$

باید به این نکته توجه داشت که مقدار قدر مطلق بخاطر این است که مشتق منحنی خطر منطقه همیشه منفی است. حال P_{PL} را به صورت گسسته به صورت زیر می‌توانیم بیان کنیم:

$$P_{PL} = P[C \leq D] = \sum_{\text{all } d_i} P[C \leq D | D = d_i] P[D = d_i] \quad (3)$$

که $P[D = d_i]$ ، احتمال وقوع تقاضای d_i می‌باشد که از منحنی بدست آمده در معادله (۲) قابل استخراج می‌باشد و معادله فوق را به صورت پیوسته می‌توان به فرم ذیل نوشت:

$$P_{PL} = \int P[C \leq d] dH_D(d) \quad (4)$$

در حقیقت معادلات (۲) و (۴) می‌توانند به صورت عددی حل شوند (برای مقادیر مختلف سه پارامتر بیان

شده) ولی برای سادگی در حل از سه فرض ساده کننده استفاده می‌کنیم. اول اینکه فرض می‌کنیم که می‌توانیم منحنی خطر $H(S_a)$ را به صورت معادله ذیل بیان نمائیم:

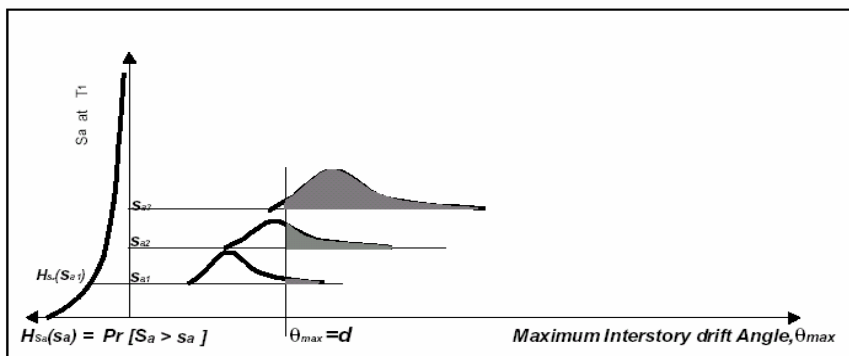
$$H(S_a) = P[S_a \geq s_a] = k_0 s_a^{-k} \quad (5)$$

یعنی فرض کرده‌ایم که منحنی خطر در مقیاس دو لگاریتمی (در محدوده کاری ما) به صورت خطی است. که بیشترین کمک را در ساده کردن حل انتگرال مینماید. مقادیر معمول برای شیب منحنی دو لگاریتمی خطر (k)، مقادیر ۱ الی ۴ می‌باشند. دوم اینکه فرض می‌کنیم می‌توانیم تقاضای تغییر مکان نسبی را به صورت تقریبی با معادله ذیل بیان نمائیم:

$$\hat{D} = a(S_a)^b \quad (6)$$

که \hat{D} میانگین تقاضای ورودی به سازه در S_a مشخص می‌باشد. و سوم آنکه فرض می‌کنیم که منحنی توزیع تقاضای تغییر مکان نسبی به صورت لوگ نرمال می‌باشد که دارای انحراف معیاری برابر β_{D/S_a} (ضریب پراکنندگی) می‌باشد.

Derivation of Drift Hazard Assuming a Log-Normal Distribution for the Drift Demand Given S_a



شکل ۱: توزیع تابع تقاضا بصورت لوگ نرمال فرض میشود

در حقیقت پارامتر β_{D/S_a} بر این نکته تأکید می‌کند که پارامتر D (در یک S_a مشخص) برای شتابنگاشت‌های مختلف یکسان نیست. روشهای مختلفی برای بدست آوردن a و b و β_{D/S_a} (یا همان β_D) وجود دارد که مستقیم‌ترین روش این است که چندین آنالیز غیرخطی انجام شود و یک میان‌یابی در منحنی D برحسب S_a انجام شود. یکی از روشها، استفاده از تحلیلهای غیرخطی فزاینده (IDA) می‌باشد. تا حال تجربه‌ها نشان داده است که مقدار $b=1$ یک مقدار پیش فرض خوب برای قابهای ممان‌گیر می‌باشد. این فرضیات با واقعیات سازگارند. برای مثال با قانون تغییر مکانهای مساوی که برای سازه‌هایی با پی‌بند متوسط، دیده می‌شود که رابطه تغییر مکان‌های الاستیک و تغییر مکانهای غیرالاستیک را می‌توان تقریباً با یک خط واحد معادل دانست.

بوسیله معادله (۶) و فرض لوگ نرمال بودن تابع خطر، می توانیم قسمت اول در معادله (۲) را به صورت زیر بیان نمائیم:

$$P[D \geq d | S_a = x] = 1 - \Phi\left(\ln[d / ax^b] / \beta_{D|S_a}\right) \quad (۷)$$

که Φ با استفاده از جدولهای استاندارد تابع توزیع گوسی بدست می آید.

با استفاده از این نتیجه ها و معادله (۲) و (۵)، منحنی خطر بیشینه تغییر مکان بین طبقه ای را می توان به صورت ذیل بیان نمود:

$$H_D(d) = P[D \geq d] = H(S_a^d) \exp\left[\frac{1}{2} \frac{k^2}{b^2} \beta_{D|S_a}^2\right] \quad (۸)$$

که S_a^d شتاب طیفی مربوط به تغییر مکان نسبی d می باشد که برعکس معادله (۶) می باشد.

$$S_a^d = (d/a)^{1/b} \quad (۹)$$

در مورد ظرفیت تغییر مکان نسبی (C) فرض می کنیم که دارای میانگینی برابر \hat{C} باشد و همچنین دارای توزیع لوگ نرمال با ضریب پراکندگی β_C باشد. با این فرضیات قسمت اول در معادله (۴) را می توان به صورت زیر بیان داشت:

$$P[C \leq d] = \Phi\left(\ln[d / \hat{C}] / \beta_C\right) \quad (۱۰)$$

با جایگزینی و بیرون آوردن از انتگرال به نتیجه ذیل خواهیم رسید:

$$P_{PL} = H\left(S_a^{\hat{C}}\right) \exp\left[\frac{1}{2} \frac{k^2}{b^2} (\beta_{D|S_a}^2 + \beta_C^2)\right] \quad (۱۱)$$

که $S_a^{\hat{C}}$ معرف شتاب طیفی مربوط به میانگین ظرفیت می باشد.

$$S_a^{\hat{C}} = (\hat{C}/a)^{1/b} \quad (۱۲)$$

در حقیقت این سطحی از S_a می باشد که انتظار تقاضای تغییر مکانی برابر با میانگین ظرفیت تغییر مکان نسبی \hat{C} را ارائه می دهد که در حقیقت با جایگزین نمودن \hat{C} و \hat{D} در معادله (۶) و حل آن بر حسب S_a انجام می شود. ولی باید توجه داشت که زلزله ای با این مقدار S_a الزاماً منجر به تغییر مکانی برابر \hat{C} نمی شود. معادله (۱۲) دلالت بر این دارد که اگر پراکندگی وجود نداشته باشد (یعنی هر دو β برابر صفر باشند)، P_{PL} به صورت ساده با جایگزین کردن این شتاب طیفی مشخص در معادله منحنی خطر بدست می آید.

برای تبدیل این نتایج معادله (۱۱) به شکلی ساده تر می توانیم P_{PL} را برابر عملکرد واقعی سازه (P_0) قرار دهیم. برای مثال $1/2500$ یا احتمال ۲ درصد در ۵۰ سال و با استفاده از معادله (۵) و ساده کردن آنها داریم.

$$\left\{ \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{k}{b} \beta_C^2\right] \right\} \hat{C} \geq \left\{ \exp\left[\frac{1}{2} \frac{k}{b} \beta_{D|S_a}^2\right] \right\} \hat{D}^{P_0} \quad (۱۳)$$

or

$$\phi \hat{C} \geq \gamma \hat{D}^{P_0}$$

\hat{D}^{P_0} بیانگر میانگین تقاضای تغییرمکان نسبی تحت شدت زلزله‌ای برابر $P_{0@S_a}$ می‌باشد.

باید توجه داشته باشیم که اگر ضرایب پراکندگی برابر صفر باشند، آنگاه \hat{D}^{P_0} ، تقاضای تغییرمکان نسبی با احتمال سالیانه وقوع P_0 برابر خواهد بود. اما چون این دو ضریب پراکندگی صفر نیستند، در حقیقت احتمال وقوع سالیانه \hat{D}^{P_0} بیشتر از P_0 می‌باشد. همانطور که در معادله (۱۳) مشخص است، فاکتور کاهشده ظرفیت (ϕ) و فاکتور افزایشده تقاضا (γ) به صورت ذیل بیان می‌شود:

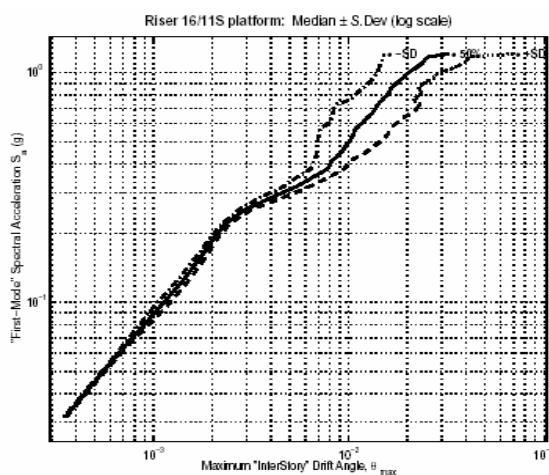
$$\phi = \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{k}{b} \beta_C^2\right] \quad (14)$$

$$\gamma = \exp\left[\frac{1}{2} \frac{k}{b} \beta_{D@S_a}^2\right] \quad (15)$$

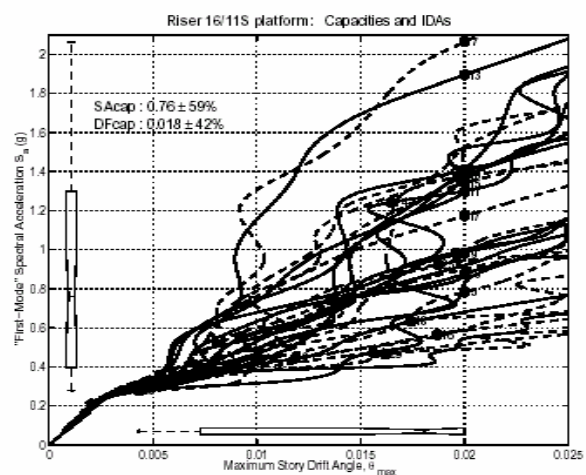
با بدست آوردن صریح نسبت این دو می‌توان اطمینان حاصل کرد که به عملکرد احتمالاتی واقعی سازه رسیده‌ایم. که بدین منظور از روش LRFD استفاده می‌کنیم که در این روش براساس تغییرمکانها قضاوت می‌شود. باید توجه داشت که هر دو ضریب (ظرفیت و تقاضا) به صورت مستقیم بستگی به مقدار ضریب پراکندگی دارند. در حقیقت در ابتدا سه عامل پیشا مدنظر بودند که تا اینجا آنها با هم ترکیب گشته‌اند.

۳- حل یک مثال

در شکل (۲) نتایج ۳۰ تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA) ارائه شده است که برای یک قاب فولادی مهاربندی شده (یک offshore jacket) انجام شده است و بیشینه تغییرمکان بین طبقه‌ای برحسب شتاب طیفی برای پریود $1/8S$ و میرایی ۵ درصد رسم شده است. بنابراین در هر S_a مشخص به تعداد ۳۰ مقدار تغییرمکان وجود دارد. تغییرات و پراکندگی این منحنی‌ها بسیار قابل توجه می‌باشند.



شکل ۳: میانگین و ۱۶ و ۸۴ درصد منحنی های IDA



شکل ۲: منحنی های IDA برای قاب های مهاربندی شده

مقادیر میانگین و ۱۶ و ۸۴ درصد توزیع تغییر مکان نیز در مقیاس لگاریتمی در شکل (۳) آمده است که از این نمودار مشخص است که شیب در ناحیه الاستیک و همچنین در ناحیه بعد از تغییر مکان نسبی ۰،۰۱ برابر واحد می‌باشد و بین این دو ناحیه (کمانش بادبندها) شیب مقداری برابر ۲/۳ دارد. کماکان تعریف ظرفیت دینامیکی کلی سیستم یک سؤال بدون جواب قطعی می‌باشد. برای بسیاری از منحنی‌ها (شتابنگاشت‌ها) واگرایی در حل عددی مسئله در مقادیر زیاد S_a اتفاق می‌افتد. مسطح شدن هر کدام از منحنی‌ها، با ناپایداری استاتیکی متناظر (قابل مقایسه) می‌باشد، یعنی تغییر مکانهای بزرگ برای افزایش کم نیروها. در هر سازه خاص، ظرفیت از شتابنگاشتی به شتابنگاشت دیگر تفاوت می‌کند. در اینجا ما نیز از تعاریف SAC برای تعیین ظرفیت استفاده می‌کنیم و آن اینکه ظرفیت نهائی تغییر مکان سازه در نقطه‌ای می‌باشد که شیب منحنی IDA به ۲۰ درصد شیب ناحیه الاستیک آن برسد و یا اینکه تغییر مکان نسبی طبقه به ۰،۰۲ برسد (هر کدام که کوچکتر باشد). این نقاط در شکل (۲) مشخص شده‌اند. به قسمی که میانگین و ضریب پراکندگی ظرفیت تغییر مکان نسبی سازه محاسبه شده است (۰/۱۸ و ۰/۴۲). با این داده‌ها می‌توانیم بعنوان مثال احتمال سالیانه کمانش بادبندها را محاسبه کنیم.

میانگین ظرفیت کمانش بادبندی‌ها = ۰/۰۳ (بر پایه قضاوت مهندسی)

ضریب پراکندگی ظرفیت کمانش بادبندی‌ها = ۰/۲

S_a مربوط به این میانگین $g = ۰/۲۵$ می‌باشد و همچنین شیب منحنی لگاریتمی میانگین تغییر مکان نسبی در شکل (۳) برابر ۲/۳ می‌باشد. ضریب پراکندگی تغییر مکان نسبی در این S_a مشخص برابر ۰/۲ می‌باشد و از منحنی خطر نیز در این مقدار S_a مقدار خطری برابر ۰/۰۰۴ با شیب $k = ۲/۵۶$ بدست می‌آید. با جایگزینی در معادله (۱۱) خواهیم داشت:

$$4 \times 10^{-3} \cdot \exp\left[\frac{1}{2}(2.56^2/2.3^2)(0.2^2 + 0.2^2)\right] = 4 \times 10^{-3} \times 1.05 = 4.2 \times 10^{-3}$$

حال با استفاده از معادله (۱۳) می‌توانیم احتمال فروریزش را کمتر از مقدار مجاز آن یعنی ۱/۲۵۰۰ قرار دهیم. مقدار S_a در این خطر برابر ۰/۶۵g می‌باشد و همچنین شیب در این نقطه از منحنی لگاریتمی خطر برابر ۳/۳ می‌باشد. در این S_a ، میانگین تغییر مکان در حدود ۰/۰۱۳ با $b=1$ می‌باشد که ضریب پراکندگی آن ۰/۳۵ می‌باشد. همانطور که در بالا توضیح داده شد، میانگین ظرفیت برای فروریزش کلی سازه ۰/۰۱۶ با ضریب پراکندگی ۰/۴۴ می‌باشد. با جایگذاری در روابط LRFD خواهیم داشت:

$$0.72(0.016) > (?) \quad 1.22(0.013) \quad \text{or} \quad 0.0115 < 0.0159$$

مشاهده می‌شود که احتمال فروریزش مجاز بیشتر می‌باشد. یا به عبارتی دیگر، تغییر مکان نسبی که بوسیله احتمال ۱/۲۵۰۰ بدست آمده است، از میانگین ظرفیت سازه کمتر می‌باشد.

۴- خلاصه و نتیجه گیری

۱- پیشایی ها و عدم قطعیت در محاسبه تقاضای لرزه‌ای و ظرفیت سازه‌ای بسیار فاکتور مهمی می‌باشد که حتماً باید برای سطح عملکرد لرزه‌ای محاسبه شوند و قضاوت مهندسی و نتایج آزمایشگاهی دو فاکتور تعیین کننده در این زمینه می‌باشند.

۲- الگوریتم جدید محاسبه براساس عملکرد که توسط پروژه SAC تبیین شده است، یک روش پر قدرت و ساده از نظر کاربرد می‌باشد؛

۳- ساختمانهای فولادی با قاب ممان گیر که براساس آئین نامه NEHRP1997 طراحی می‌شوند، انتظار می‌رود که در زلزله‌های بزرگ رفتاری بس بهتر از خود نشان دهند.

۴- روش طراحی بر اساس ظرفیت و تقاضا اولین روشی است که برای بدست آوردن ظرفیت سازه بصورت احتمالاتی برخورد می‌کند.

۵- امروزه با اضافه شدن قدرت تحلیل کامپیوترها امکان تحلیل دقیقتر فراهم آمده است و ضمناً روشهای موجود می‌توان تعداد تحلیلها را کاهش داد و برای مثال از منحنی‌های میانگین IDA استفاده نمود. بصورت کلی بهینه سازی تعداد آنالیزها میتواند یکی از موضوعات قابل تحقیق باشد.

۶- توسعه روش طراحی بر اساس ظرفیت و تقاضا برای سازه های بتنی، سازه های نامنظم، و... و بدست آوردن عدم قطعیت های موجود در این نوع سازه ها و تبدیل این مفاهیم به روش های قابل استفاده در آیین نامه ها میتواند قابل توجه باشد.

۵- منابع و مراجع:

- [1] "Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings" Report No. FEMA-350, SAC Joint Venture, Federal Emergency Management Agency, Washington DC, 2000.
- [2] "Recommended seismic evaluation and upgrade criteria for existing welded steel moment-frame building" Report No. FEMA-351, SAC Joint venture, Federal Emergency Management Agency, Washington DC, 2000.
- [3] Chopra AK, "Dynamics of structures" Printice Hall: New Jersey, 1995; 257-259.
- [4] Cornell CA, Jalayer F, Hamburger RO, Foutch DA "The probabilistic basis for the 2000 SAC/FEMA steel moment frame guidelines" ASCE Journal of Structural Engineering 2001; (submitted).
- [5] Cornell CA, Krawinkler H. "Progress and challenge in seismic performance assessment" PEER Center News 2000; 3(2);
- [6] FEMA (2000a). "Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings" Report No. FEMA-350, SAC Joint Venture, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- [7] FEMA (2000b). "Recommended Seismic Evaluation and Upgrade Criteria for Existing Welded Steel Moment-Frame Buildings" Report No. FEMA-351, SAC Joint Venture, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- [8] Jalayer, F. and Cornell, C. A. (1998). "Development of a Probability-Based Demand and Capacity Factor Design Seismic Format." Internal technical memo. Department of Civil Engineering, Stanford University, Stanford, CA.
- [9] Vamvatsikos, D. and Cornell, C. A. (2001). "Incremental Dynamic Analysis" submitted to Earthquake Engineering and Structural Dynamics.