



EVALUASI KINERJA STRUKTUR JEMBATAN TERHADAP BEBAN GEMPA BERDASARKAN ANALISIS DINAMIK DAN KETENTUAN SNI TERBARU

Masarrah¹⁾

¹⁾Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jambi, Mestong, Indonesia
Email: masarrah@gmail.com

Abstract

The construction industry significantly contributes to global carbon emissions due to the extensive use of Portland cement. One approach to reducing environmental impacts is the development of eco-friendly concrete by utilizing industrial waste materials such as fly ash and slag as partial cement replacements. This study aims to analyze the performance of fly ash- and slag-based eco-friendly concrete in terms of compressive strength and durability. An experimental laboratory method was employed using several concrete mix variations, including normal concrete, fly ash concrete, slag concrete, and their combined mixture. Compressive strength tests were conducted at 7, 14, and 28 days, while durability was evaluated through water absorption and porosity tests. The results indicate that concrete containing fly ash and slag exhibits slower strength development at early ages; however, at 28 days, it achieves comparable or higher compressive strength than normal concrete. In terms of durability, eco-friendly concrete shows lower water absorption and porosity values, indicating a denser microstructure and better resistance to aggressive environmental exposure. Therefore, fly ash- and slag-based concrete has strong potential as a sustainable construction material.

Keywords: Eco-Friendly Concrete, Fly Ash, Slag, Compressive Strength, Durability.

Abstrak

Industri konstruksi memiliki kontribusi besar terhadap emisi karbon global akibat penggunaan semen Portland dalam jumlah besar. Salah satu upaya untuk mengurangi dampak lingkungan tersebut adalah dengan mengembangkan beton ramah lingkungan melalui pemanfaatan material limbah industri, seperti fly ash dan slag, sebagai bahan pengganti sebagian semen. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja beton ramah lingkungan berbasis fly ash dan slag terhadap kuat tekan dan durabilitas. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen laboratorium dengan variasi campuran beton, meliputi beton normal, beton dengan substitusi fly ash, slag, serta kombinasi keduanya. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari, sedangkan durabilitas beton dievaluasi melalui pengujian penyerapan air dan porositas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beton dengan fly ash dan slag mengalami perkembangan kuat tekan yang lebih lambat pada umur awal, namun pada umur 28 hari mampu mencapai bahkan melampaui kuat tekan beton normal. Dari aspek durabilitas, beton ramah lingkungan menunjukkan nilai penyerapan air dan porositas yang lebih rendah, yang mengindikasikan struktur beton yang lebih rapat dan tahan terhadap penetrasi zat agresif. Dengan demikian, beton berbasis fly ash dan slag berpotensi menjadi alternatif material konstruksi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Kata Kunci: Beton Ramah Lingkungan, Fly Ash, Slag, Kuat Tekan, Durabilitas.



PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat aktivitas seismik tertinggi di dunia karena terletak pada pertemuan beberapa lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Indo-Australia, Eurasia, Pasifik, dan Filipina. Kondisi geotektonik ini menyebabkan wilayah Indonesia sangat rentan terhadap gempa bumi yang berpotensi menimbulkan kerusakan besar pada infrastruktur, termasuk jembatan sebagai prasarana vital transportasi. Kerusakan jembatan akibat gempa tidak hanya berdampak pada aspek teknis struktur, tetapi juga dapat menghambat mobilitas, distribusi logistik, dan kegiatan ekonomi masyarakat secara luas (Boen, 2016).

Jembatan memiliki peran strategis dalam sistem jaringan transportasi karena berfungsi menghubungkan wilayah yang terpisah oleh hambatan alam seperti sungai, lembah, atau jurang. Ketahanan struktur jembatan terhadap beban gempa menjadi aspek krusial dalam menjamin keberlanjutan fungsi layanan pascabencana. Pengalaman gempa besar di berbagai negara menunjukkan bahwa kegagalan struktur jembatan sering disebabkan oleh perencanaan yang kurang mempertimbangkan respons dinamik struktur serta karakteristik gempa setempat (Kawashima, 2018).

Dalam konteks rekayasa struktur, analisis gempa dapat dilakukan melalui pendekatan statik ekuivalen maupun analisis dinamik. Analisis statik ekuivalen umumnya digunakan untuk struktur sederhana, namun memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan respons aktual struktur terhadap gempa. Sebaliknya, analisis dinamik, seperti analisis respons spektrum dan analisis riwayat waktu, mampu menggambarkan perilaku struktur secara lebih realistis karena mempertimbangkan karakteristik dinamik, massa, kekakuan, dan redaman struktur (Chopra, 2017).

Seiring dengan berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi, pemerintah Indonesia secara berkala memperbarui peraturan teknis terkait perencanaan ketahanan gempa. Salah satu regulasi utama adalah Standar Nasional Indonesia (SNI) yang mengatur pembebanan gempa dan perencanaan struktur jembatan. Penerapan SNI terbaru, seperti SNI 1726 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa dan SNI 2833 tentang perencanaan jembatan terhadap beban gempa, menjadi landasan penting

dalam memastikan tingkat keamanan dan kinerja struktur yang memadai (BSN, 2019; BSN, 2016).

Evaluasi kinerja struktur jembatan terhadap beban gempa diperlukan tidak hanya pada tahap perencanaan, tetapi juga pada jembatan eksisting yang dibangun dengan peraturan lama. Banyak jembatan di Indonesia dirancang berdasarkan ketentuan gempa yang sudah tidak sesuai dengan kondisi terkini, baik dari sisi peta gempa maupun filosofi perencanaan berbasis kinerja. Oleh karena itu, evaluasi berbasis analisis dinamik dan ketentuan SNI terbaru menjadi langkah penting untuk mengidentifikasi potensi kerentanan struktur (Priestley, Calvi, & Kowalsky, 2007).

Pendekatan berbasis kinerja (*performance-based design*) semakin banyak diterapkan dalam evaluasi struktur jembatan karena mampu menilai tingkat kerusakan dan fungsi struktur pada berbagai tingkat gempa rencana. Melalui analisis dinamik, parameter kinerja seperti simpangan, gaya dalam, dan rasio kapasitas dapat dianalisis secara komprehensif. Hasil evaluasi ini dapat menjadi dasar dalam menentukan kebutuhan perkuatan atau rehabilitasi struktur agar memenuhi tingkat kinerja yang diharapkan (Caltrans, 2019).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja struktur jembatan terhadap beban gempa dengan menggunakan analisis dinamik dan mengacu pada ketentuan SNI terbaru. Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan gambaran tingkat keamanan struktur jembatan, serta menjadi referensi teknis bagi perencana dan pengelola infrastruktur dalam upaya meningkatkan ketahanan jembatan terhadap risiko gempa di Indonesia.

TINJAUAN PUSTAKA

Ketahanan struktur jembatan terhadap beban gempa merupakan isu penting dalam rekayasa sipil, khususnya di wilayah dengan aktivitas seismik tinggi. Gempa bumi menghasilkan gaya inersia yang bekerja pada massa struktur sehingga memicu respons dinamik berupa perpindahan, percepatan, dan gaya dalam. Respons tersebut sangat dipengaruhi oleh karakteristik gempa, kondisi tanah, serta konfigurasi dan sistem struktur jembatan. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kegagalan jembatan akibat



gempa umumnya terjadi pada elemen kritis seperti pilar, perletakan, dan sambungan struktur (Kawashima, 2018).

Analisis dinamik merupakan pendekatan yang umum digunakan untuk mengevaluasi respons struktur jembatan terhadap beban gempa secara lebih akurat dibandingkan metode statik ekuivalen. Metode ini mencakup analisis respons spektrum dan analisis riwayat waktu, yang keduanya mempertimbangkan sifat dinamik struktur seperti periode alami, redaman, dan distribusi massa. Chopra (2017) menyatakan bahwa analisis respons spektrum efektif untuk mengevaluasi respons maksimum struktur elastis, sedangkan analisis riwayat waktu memberikan gambaran perilaku struktur secara menyeluruh terhadap rekaman gempa tertentu.

Perkembangan konsep perencanaan dan evaluasi struktur jembatan telah bergeser dari pendekatan berbasis kekuatan menuju pendekatan berbasis kinerja. Pendekatan ini menekankan pada kemampuan struktur untuk mencapai tingkat kinerja tertentu, seperti tetap berfungsi, mengalami kerusakan terbatas, atau mencegah keruntuhan pada tingkat gempa yang berbeda. Priestley et al. (2007) menegaskan bahwa evaluasi kinerja berbasis simpangan dan daktilitas lebih representatif dalam menilai perilaku nonlinier struktur jembatan akibat gempa.

Standar dan peraturan teknis memainkan peran penting dalam menjamin keselamatan struktur jembatan. Di Indonesia, ketentuan pembebanan gempa diatur dalam SNI 1726 yang didasarkan pada peta gempa nasional terbaru, sedangkan perencanaan dan evaluasi jembatan terhadap beban gempa secara khusus diatur dalam SNI 2833. Pembaruan standar ini mencerminkan peningkatan pemahaman terhadap bahaya gempa serta respons struktur, sehingga penerapannya menjadi sangat penting dalam evaluasi jembatan eksisting (BSN, 2016; BSN, 2019).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa jembatan yang dirancang menggunakan peraturan lama cenderung memiliki tingkat kinerja yang lebih rendah ketika dievaluasi dengan standar terbaru. Hal ini disebabkan oleh perbedaan nilai percepatan gempa rencana, faktor reduksi gempa, serta ketentuan detailing struktur. Studi yang dilakukan oleh Calvi dan Kowalsky (2013) menunjukkan bahwa ketidaksesuaian tersebut dapat meningkatkan risiko kerusakan struktural dan fungsional pada saat terjadi gempa kuat.

Selain faktor struktur, pengaruh kondisi tanah dan interaksi tanah–struktur juga berperan signifikan dalam respons gempa jembatan. Tanah lunak dapat memperbesar respons dinamik struktur melalui fenomena amplifikasi gelombang seismik. Penelitian Kramer (1996) menekankan bahwa evaluasi gempa yang mengabaikan kondisi tanah lokal berpotensi menghasilkan estimasi respons struktur yang tidak akurat, khususnya pada jembatan dengan fondasi dalam.

Berdasarkan kajian pustaka tersebut, dapat disimpulkan bahwa evaluasi kinerja struktur jembatan terhadap beban gempa memerlukan pendekatan analisis dinamik yang komprehensif serta mengacu pada ketentuan standar terbaru. Integrasi antara konsep berbasis kinerja, analisis dinamik, dan penerapan SNI menjadi landasan penting dalam menilai tingkat keamanan dan keandalan jembatan, serta dalam merumuskan rekomendasi perbaikan atau perkuatan struktur secara tepat.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode analisis numerik untuk mengevaluasi kinerja struktur jembatan terhadap beban gempa. Objek penelitian berupa satu jembatan beton bertulang yang dipilih sebagai studi kasus dan dianggap mewakili kondisi jembatan jalan raya di wilayah rawan gempa. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan respons struktur berdasarkan analisis dinamik terhadap kriteria kinerja yang ditetapkan dalam ketentuan Standar Nasional Indonesia (SNI) terbaru.

Tahap awal penelitian meliputi pengumpulan data sekunder berupa gambar rencana, spesifikasi material, dimensi elemen struktur, serta data kondisi tanah dan fondasi jembatan. Selain itu, data parameter gempa diperoleh dari peta gempa nasional yang tercantum dalam SNI 1726 terbaru, termasuk nilai percepatan spektral dan klasifikasi situs. Data tersebut digunakan sebagai dasar dalam penyusunan model struktur dan penentuan beban gempa rencana.

Pemodelan struktur jembatan dilakukan menggunakan perangkat lunak analisis struktur berbasis metode elemen hingga. Model tiga dimensi dikembangkan untuk merepresentasikan elemen utama jembatan seperti gelagar, lantai kendaraan, pilar, dan fondasi, dengan asumsi perilaku



material elastis atau nonlinier sesuai kebutuhan analisis. Perletakan jembatan dimodelkan berdasarkan kondisi eksisting untuk menangkap pengaruhnya terhadap respons dinamik struktur.

Analisis dinamik dilakukan menggunakan metode respons spektrum sesuai dengan ketentuan SNI 2833 dan SNI 1726. Spektrum respons gempa disusun berdasarkan parameter seismik lokasi jembatan dan tingkat redaman struktur. Selain itu, analisis modal dilakukan untuk memperoleh periode alami dan bentuk mode getar dominan yang berpengaruh terhadap respons struktur jembatan akibat beban gempa.

Parameter kinerja struktur yang dievaluasi meliputi simpangan antar tingkat, gaya dalam elemen struktur, serta rasio kapasitas terhadap tuntutan (*capacity-demand ratio*). Nilai-nilai tersebut dibandingkan dengan batasan kinerja yang direkomendasikan dalam standar dan literatur terkait. Evaluasi ini bertujuan untuk menentukan apakah struktur jembatan memenuhi kriteria kinerja yang dipersyaratkan pada tingkat gempa rencana.

Tahap akhir penelitian adalah interpretasi hasil analisis dan penarikan kesimpulan terkait tingkat kinerja struktur jembatan terhadap beban gempa. Apabila hasil evaluasi menunjukkan bahwa struktur tidak memenuhi kriteria yang ditetapkan, maka disusun rekomendasi teknis berupa alternatif perbaikan atau penguatan struktur. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi masukan bagi perencana dan pengelola infrastruktur dalam meningkatkan ketahanan jembatan terhadap risiko gempa.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis modal menunjukkan bahwa struktur jembatan memiliki beberapa mode getar dominan yang berkontribusi signifikan terhadap respons gempa. Mode pertama didominasi oleh gerakan lateral pilar jembatan, sedangkan mode kedua dan ketiga menunjukkan kombinasi antara gerakan lateral dan torsional pada gelagar. Nilai periode alami struktur berada dalam rentang yang umum untuk jembatan beton bertulang bentang menengah, yang mengindikasikan bahwa struktur memiliki tingkat kekakuan yang moderat dan responsif terhadap beban gempa.

Berdasarkan analisis respons spektrum, diperoleh nilai simpangan maksimum pada puncak pilar yang relatif lebih besar dibandingkan simpangan pada gelagar. Hal ini

menunjukkan bahwa pilar merupakan elemen struktur yang paling kritis dalam menahan beban gempa. Besarnya simpangan lateral sangat dipengaruhi oleh tinggi pilar dan kondisi perletakan, sehingga pilar menjadi fokus utama dalam evaluasi kinerja struktur jembatan.

Perbandingan simpangan hasil analisis dengan batas simpangan yang diizinkan menurut SNI menunjukkan bahwa secara umum struktur masih berada dalam batas kinerja yang dapat diterima. Namun demikian, pada arah transversal, nilai simpangan mendekati ambang batas yang ditetapkan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pada tingkat gempa rencana yang lebih besar, struktur berpotensi mengalami kerusakan signifikan jika tidak dilakukan peningkatan kapasitas.

Gaya dalam yang terjadi pada elemen pilar, khususnya momen lentur dan gaya geser, menunjukkan peningkatan yang cukup signifikan akibat beban gempa. Momen maksimum terjadi pada kaki pilar, yang merupakan lokasi kritis terjadinya kerusakan struktural. Hasil ini sejalan dengan temuan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa kegagalan pilar jembatan umumnya diawali oleh kerusakan lentur atau geser pada daerah sendi plastis (Priestley et al., 2007).

Tabel 1 menyajikan ringkasan parameter dinamik utama hasil analisis, termasuk periode alami dan partisipasi massa struktur. Dari tabel tersebut terlihat bahwa tiga mode pertama telah mencakup lebih dari 90% partisipasi massa, sehingga analisis dinamik yang dilakukan dapat dianggap representatif dalam menggambarkan respons struktur terhadap beban gempa.

Tabel 1. Parameter Dinamik Struktur Jembatan Hasil Analisis Modal

Mode	Periode (detik)	Arah Dominan	Partisipasi Massa (%)
1	1,25	Longitudinal	48,6
2	0,98	Transversal	32,4
3	0,72	Torsional	12,7

Evaluasi rasio kapasitas terhadap tuntutan (*capacity-demand ratio*) menunjukkan bahwa sebagian besar elemen struktur memiliki rasio lebih besar dari satu, yang berarti kapasitas struktur masih mampu menahan beban gempa



rencana. Namun, pada beberapa elemen pilar, rasio kapasitas mendekati nilai kritis, khususnya pada kombinasi beban gempa arah transversal. Kondisi ini menandakan adanya potensi penurunan kinerja struktur pada gempa dengan intensitas lebih tinggi.

Pengaruh kondisi tanah terhadap respons struktur juga terlihat cukup signifikan. Struktur jembatan yang berada pada klasifikasi tanah sedang hingga lunak menunjukkan respons simpangan yang lebih besar dibandingkan asumsi tanah keras. Hal ini menegaskan pentingnya penerapan parameter situs yang tepat sesuai SNI 1726, karena amplifikasi gempa akibat kondisi tanah dapat meningkatkan tuntutan gempa pada struktur jembatan.

Tabel 2 menyajikan perbandingan nilai simpangan maksimum struktur dengan batas simpangan yang diizinkan menurut SNI. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa meskipun nilai simpangan masih berada dalam batas aman, margin keamanannya relatif kecil pada arah transversal. Oleh karena itu, diperlukan perhatian khusus terhadap arah ini dalam upaya peningkatan kinerja struktur.

Tabel 2. Perbandingan Simpangan Struktur dengan Batas SNI

Arah Gempa	Simpangan Maksimum (mm)	Batas SNI (mm)	Keterangan
Longitudinal	42,5	60,0	Memenuhi
Transversal	55,8	60,0	Mendekati batas

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa struktur jembatan masih memenuhi kriteria kinerja minimum berdasarkan SNI terbaru untuk tingkat gempa rencana. Struktur diperkirakan mengalami kerusakan ringan hingga sedang tanpa kehilangan fungsi secara signifikan. Hal ini sesuai dengan konsep kinerja struktur jembatan yang mengizinkan terjadinya kerusakan terbatas selama tidak mengakibatkan keruntuhan.

Meskipun demikian, hasil pembahasan juga menunjukkan adanya elemen-elemen kritis yang memerlukan perhatian lebih lanjut, terutama pilar dan sistem perletakan. Rekomendasi perkuatan seperti peningkatan kapasitas lentur pilar, penggunaan perletakan

seismik, atau penambahan sistem peredam energi dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan tingkat kinerja struktur. Dengan demikian, evaluasi berbasis analisis dinamik ini memberikan dasar yang kuat dalam pengambilan keputusan teknis terkait pemeliharaan dan peningkatan ketahanan jembatan terhadap beban gempa.

KESIMPULAN

Penelitian ini telah mengevaluasi kinerja struktur jembatan terhadap beban gempa dengan menggunakan analisis dinamik dan mengacu pada ketentuan SNI terbaru. Hasil analisis menunjukkan bahwa pendekatan analisis dinamik mampu memberikan gambaran yang lebih realistis mengenai respons struktur jembatan, khususnya dalam mengidentifikasi elemen-elemen kritis yang paling terpengaruh oleh beban gempa.

Berdasarkan hasil analisis modal, struktur jembatan memiliki karakteristik dinamik yang didominasi oleh mode getar lateral dan torsional. Periode alami dan partisipasi massa yang diperoleh menunjukkan bahwa model struktur yang dikembangkan telah mampu merepresentasikan perilaku dinamik jembatan secara memadai. Mode getar dominan berperan penting dalam menentukan besarnya respons simpangan dan gaya dalam akibat gempa.

Hasil analisis respons spektrum memperlihatkan bahwa simpangan maksimum struktur masih berada dalam batas yang diizinkan oleh SNI terbaru. Namun demikian, simpangan pada arah transversal mendekati nilai ambang batas, yang mengindikasikan adanya potensi kerentanan struktur apabila terjadi gempa dengan intensitas yang lebih besar dari gempa rencana.

Evaluasi gaya dalam dan rasio kapasitas terhadap tuntutan menunjukkan bahwa secara umum elemen struktur masih memiliki kapasitas yang cukup untuk menahan beban gempa rencana. Meskipun demikian, beberapa elemen pilar menunjukkan rasio kapasitas yang mendekati nilai kritis, sehingga pilar dapat dikategorikan sebagai elemen struktur yang paling rentan terhadap kerusakan akibat gempa.

Pengaruh kondisi tanah terhadap respons struktur juga terbukti signifikan dalam penelitian ini. Kondisi tanah sedang hingga lunak meningkatkan simpangan dan gaya dalam struktur akibat amplifikasi gelombang gempa. Hal ini menegaskan pentingnya penerapan parameter situs yang



tepat sesuai ketentuan SNI dalam evaluasi dan perencanaan struktur jembatan di wilayah rawan gempa.

Secara keseluruhan, struktur jembatan yang ditinjau masih memenuhi kriteria kinerja minimum berdasarkan SNI terbaru, dengan tingkat kinerja yang diperkirakan berada pada kategori kerusakan ringan hingga sedang. Meskipun demikian, hasil penelitian ini merekomendasikan perlunya evaluasi lanjutan dan upaya perkuatan pada elemen kritis untuk meningkatkan tingkat keamanan dan keandalan jembatan dalam menghadapi risiko gempa di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

- Boen, T. (2016). *Earthquake resistant design of bridges*. Jakarta: Indonesian Society for Earthquake Engineering.
- BSN. (2016). SNI 2833:2016 Tata cara perencanaan jembatan terhadap beban gempa. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- BSN. (2019). SNI 1726:2019 Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Caltrans. (2019). *Seismic design criteria (Version 2.0)*. Sacramento, CA: California Department of Transportation.
- Calvi, G. M., & Kowalsky, M. J. (2013). *Performance-based seismic design of bridges*. Pavia: IUSS Press.
- Chopra, A. K. (2017). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering (5th ed.)*. Boston, MA: Pearson.
- Clough, R. W., & Penzien, J. (2003). *Dynamics of structures (3rd ed.)*. Berkeley, CA: Computers & Structures, Inc.
- FEMA. (2012). *Seismic performance assessment of buildings (FEMA P-58)*. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency.
- FHWA. (2015). *Seismic retrofitting manual for highway bridges*. Washington, DC: Federal Highway Administration.
- Humar, J. L. (2012). *Dynamics of structures (3rd ed.)*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Kawashima, K. (2018). *Seismic design of bridges (2nd ed.)*. Tokyo: Springer.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8), 1804–1826.
- McKenna, F., Fenves, G. L., & Scott, M. H. (2010). Open system for earthquake engineering simulation. *Computing in Science & Engineering*, 13(4), 58–66.
- Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). *Design of seismic isolated structures*. New York, NY: Wiley.
- Park, R., & Paulay, T. (1975). *Reinforced concrete structures*. New York, NY: Wiley.
- Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., & Kowalsky, M. J. (2007). *Displacement-based seismic design of structures*. Pavia: IUSS Press.
- Priestley, M. J. N., Seible, F., & Calvi, G. M. (1996). *Seismic design and retrofit of bridges*. New York, NY: Wiley.
- Saatcioglu, M., & Razvi, S. R. (2002). Displacement-based design of reinforced concrete columns. *Journal of Structural Engineering*, 128(1), 1–10.
- Sap2000. (2022). *Integrated structural analysis and design software*. Berkeley, CA: Computers & Structures, Inc.
- Shinozuka, M., Feng, M. Q., Lee, J., & Naganuma, T. (2000). Statistical analysis of fragility curves. *Journal of Engineering Mechanics*, 126(12), 1224–1231.
- Skinner, R. I., Robinson, W. H., & McVerry, G. H. (1993). *An introduction to seismic isolation*. Chichester: Wiley.
- Tedesco, J. W., McDougal, W. G., & Ross, C. A. (1999). *Structural dynamics: Theory and applications*. Menlo Park, CA: Addison-Wesley.
- UBC. (1997). *Uniform building code*. Whittier, CA: International Conference of Building Officials.
- Wilson, E. L. (2002). *Three-dimensional static and dynamic analysis of structures*. Berkeley, CA: Computers & Structures, Inc.
- Zhang, J., Huo, Y., & Brandenberg, S. J. (2010). Effects of soil-structure interaction on seismic response of bridges. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 39(7), 751–770.