

**PEMODELAN BENTURAN DUA KOLOM DENGAN MENGGUNAKAN
PENDEKATAN ELEMEN KONTAK
PADA PILAR JEMBATAN
(MODELIZATION OF TWO COLUMN POUNDING BY USING
CONTACT ELEMENT APPROACH IN BRIDGE PIERS)**

Winarputro Adi Riyono

Pusat Litbang Jalan dan Jembatan
Jl. A.H. Nasution No. 264, Bandung 40294
e-mail : winarputro.adi@pusjatan.pu.go.id
Diterima: 07 September 2012, disetujui: 04 Desember 2012

ABSTRAK

Benturan merupakan fenomena dinamik yang memberikan efek yang besar terhadap respon struktur. Benturan dapat terjadi di antara dua atau lebih elemen struktur yang berdekatan termasuk benturan dua kolom jembatan. Salah satu penyebab terjadinya mekanisme benturan yaitu perbedaan karakteristik dinamik kolom jembatan yang berdekatan. Pada kajian ini, dibahas pengaruh rasio fleksibilitas struktur (T_1/T_2) terhadap mekanisme benturan 2 buah kolom sederhana. Analisis dilakukan dengan menggunakan pendekatan elemen kontak dengan bantuan program analisis struktur. Elemen kontak yang digunakan berupa elemen pegas linier. Struktur dimodelkan sebagai dua buah kolom yang terpisah dengan tinggi yang sama dan menggunakan 4 variasi dimensi sehingga memiliki 4 variasi rasio periode alami yaitu 0,33, 0,44, 0,67, dan 0,95. Struktur dianalisis dengan menggunakan analisis nonlinier riwayat waktu dengan eksitasi dinamik yang digunakan berupa gempa El-Centro komponen N-S. Melalui analisis diperoleh hasil bahwa dua struktur dengan rasio periode alami yang rendah memiliki frekuensi kontak dan respon gaya kontak yang lebih besar dibandingkan dengan dua struktur dengan rasio periode alami yang lebih tinggi. Hal ini mencerminkan bahwa dua buah struktur dengan periode alami yang berjauhan rentan terhadap benturan.

Kata kunci: benturan, elemen kontak, rasio periode alami, elemen pegas linier, analisis riwayat waktu

ABSTRACT

Pounding is a dynamic phenomenon which gives a large effect to the structural responses. Pounding could happen between two or more adjacent structures includes pounding between two columns of a bridge structure. One cause of the pounding mechanism is a different dynamic characteristic between two adjacent structures. In this paper, the effect of structures flexibility ratio (T_1/T_2) to the pounding mechanism between two columns was studied. Analysis was performed by using a contact element approach from structural analysis software. Contact element used here is a linear spring element. Structure is modeled as two columns separated each other with equal height with 4 cross section variations, then produces 4 natural period ratios which are 0.33, 0.44, 0.67, and 0.95. Structures are analyzed by using nonlinear time history analysis with excitation as N-S component of El-Centro earthquake. From analysis, it is found that two structures with lower natural period ratio will induce contact more frequently and give more contact force than two structures with higher natural period ratio. This, reflects that adjacent structures with large difference in natural period are vulnerable to a pounding.

Keywords: pounding, contact element, natural period ratio, linear spring element, time history analysis

PENDAHULUAN

Pounding merupakan fenomena dinamik yang memberikan efek yang besar terhadap respon struktur. *Pounding* umumnya terjadi oleh karena perbedaan periode alami yang besar pada dua atau lebih struktur yang memiliki karakteristik dinamik yang berbeda (Susendar 2002). *Pounding* dapat menyebabkan kerusakan struktur berupa *spalling* pada beton di daerah perletakan dan menghasilkan benturan dengan gaya impak pada struktur yang berdekatan. Gaya tersebut umumnya lebih besar dibandingkan dengan gaya rencana struktur saat direncanakan. Hal ini menunjukkan pentingnya perencanaan dengan memperhitungkan respon struktur akibat benturan khususnya saat terjadi gempa.

Selama empat dekade terakhir, kasus terkait dengan *pounding* akibat gempa khususnya pada jembatan telah banyak ditemukan. Gempa Loma Prieta tahun 1989 memperlihatkan mekanisme *pounding* pada jembatan portal majemuk (NZNSSEE 1990). Kerusakan akibat *pounding* terjadi pada bagian siar muai dan kepala jembatan beberapa jembatan jalan antarkota yang berlokasi dekat dengan episenter gempa saat gempa Northridge tahun 1994 (EERI 1995a) Benturan antara dek jembatan dan abutment merusak jembatan akibat gempa yang sama (Jennings 1971). Kejadian gempa Tasikmalaya menyebabkan boks girder jembatan Pasupati mengalami pergerakan dan bagian *vertical buffer* berubah posisi sehingga mengakibatkan retak pada kepala jembatan (Sukmara 2009).

Makalah ini melihat seberapa jauh pengaruh rasio fleksibilitas struktur yang berdekatan terhadap kemungkinan kontak dua struktur yang berdekatan. Modelisasi dan simulasi dilakukan dengan menggunakan program analisis struktur SAP 2000.

KAJIAN PUSTAKA

Beberapa pendekatan yang dapat digunakan untuk mensimulasi *pounding* dua buah struktur yaitu dengan menggunakan pendekatan elemen kontak seperti elemen pegas linier, elemen *Kelvin Voigt*, elemen *Hertz* atau dengan pendekatan stereomekanikal.

Elemen pegas linier

Pada model ini, pegas mulai bekerja saat celah antara struktur mengecil dan terjadi kontak antara dua struktur. Maison dan Kasai (1992) telah menggunakan elemen ini untuk mempelajari benturan antara gedung yang berdekatan. Modelisasi benturan dengan model pegas linier dan hubungan gaya kontak dengan simpangan relatif yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 1 dengan formulasi sebagai berikut :

$$f = k(\delta_{rel} - O) \dots \dots \dots \text{bila } (\delta_{rel} - O) > 0 \dots \dots (1)$$

$$f = 0 \dots \dots \text{bila } (\delta_{rel} - O) \leq 0 \dots \dots \dots (2)$$

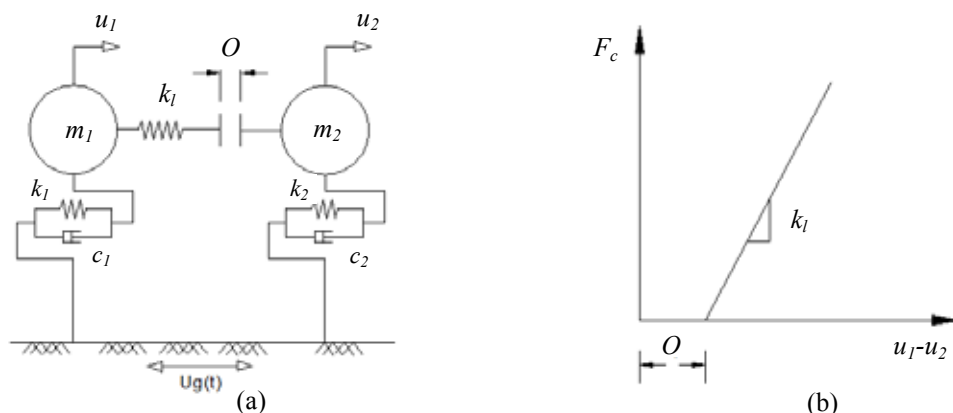
Keterangan:

f = gaya kontak (kN)

k = kekakuan elemen kontak (kN/m)

δ_{rel} = simpangan relatif (m)

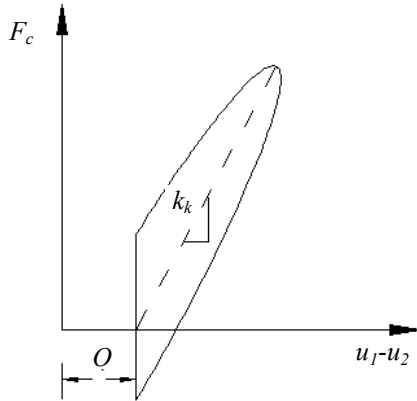
O = celah/bukaan (m)



Gambar 1. Model rheologi kontak dua struktur (a) dan hubungan gaya-simpangan relatif (b)

Elemen Kelvin Voigt

Model *Kelvin Voigt* menggunakan pegas untuk mensimulasi gaya kontak yang terjadi dan peredam untuk memperhitungkan mekanisme kehilangan energy selama proses benturan (Gambar 2). Koefisien redaman dapat dihubungkan dengan koefisien restitusi dengan menyamakan energi yang hilang selama benturan.

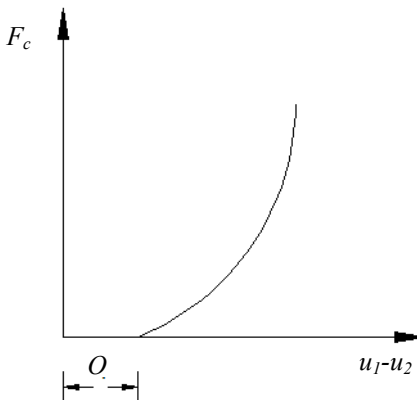


Gambar 2. Hubungan gaya-simpangan relatif pada elemen *Kelvin Voigt*

$$c_k = 2\xi \sqrt{k_k \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right)} \dots\dots\dots (3)$$

$$\xi = - \frac{\ln e}{\sqrt{\pi^2 + (\ln e)^2}} \dots\dots\dots (4)$$

- Keterangan:
 c_k = koefisien redaman (kN)
 k_k = kekakuan dari elemen kontak (kN/m)
 $m_{1,2}$ = massa struktur yang berbenturan (kN)
 e = koefisien restitusi



Gambar 3. Hubungan gaya-simpangan relatif pada elemen kontak *Hertz*

Elemen kontak Hertz

Pemodelan selanjutnya adalah dengan menggunakan elemen pegas nonlinier yang berdasarkan dari hukum kontak *Hertz* (Gambar 3). Gaya kontak dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} F(t) &= R[x(t)-O]^n && ;x(t) \geq O \\ F(t) &= 0 && ;x(t) < O \end{aligned} \dots\dots\dots (5)$$

- Keterangan:
 R = kekakuan benturan (kN/m)
 $x(t)$ = simpangan relatif (m)
 O = celah/gap (m)
 n = koefisien *Hertz* ($n=1,5$)

Model *Hertz* dapat digunakan untuk kontak statis antar struktur yang elastis, namun tidak dapat memodelkan mekanisme disipasi energi selama proses benturan.

Modelisasi benturan dengan pendekatan elemen kontak memiliki keterbatasan terkait dengan besarnya kekakuan yang dapat merepresentasikan kekakuan saat terjadi benturan. Ini dikarenakan tidak diketahuinya geometri permukaan yang berbenturan serta ketidakpastian properti material akibat pengaruh beban benturan. Kekakuan elemen kontak biasanya diambil sebagai *in-plane stiffness* dari struktur yang berbenturan (Maison dan Kasai 1990a). Pendekatan lain adalah *impact stiffness* dapat didekati sebesar dua puluh kali kekakuan struktur yang lebih kaku (Anagnostopoulos 1988). Namun, kekakuan kontak harus dibatasi karena apabila terlalu besar maka dapat menyebabkan ketidakstabilan dari persamaan dinamik yang telah dirumuskan. Benturan juga dapat dimodelkan dengan *viscoelastic model of collision* (Jankowski 2004). Pegas linier dengan kekakuan yang besar digunakan agar waktu benturan yang terjadi menjadi singkat.

Pendekatan Stereomekanikal

Apabila dua buah benda bergerak saling mendekati dengan kecepatan tertentu dan berlawanan arah maka akan terjadi benturan. Benturan juga dapat terjadi tanpa harus berlawanan arah namun kedua benda memiliki kecepatan yang berbeda. Pada pendekatan stereomekanikal, digunakan koefisien restitusi yang merupakan perbandingan antara kecepatan relatif setelah benturan terhadap kecepatan relatif sebelum terjadi benturan (Szuladzinski 1982).

HIPOTESIS

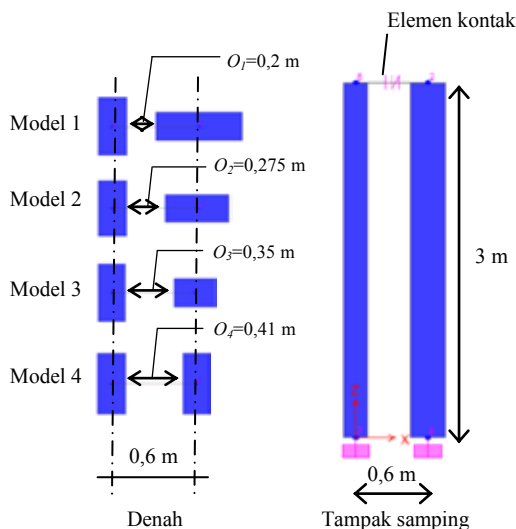
Dua struktur yang berdekatan dengan rasio periode alami yang rendah memiliki kemungkinan kontak yang lebih besar dibandingkan dengan struktur dengan rasio periode alami mendekati 1.

METODOLOGI

Metode yang digunakan yaitu dengan menggunakan bantuan perangkat lunak analisis struktur dilakukan pemodelan 2 buah kolom (Gambar 4) yang memiliki variasi dimensi dan dilengkapi dengan elemen kontak (Gambar 5) pada puncak kolom. Elemen kontak yang digunakan dalam pemodelan yaitu elemen pegas linier. Pada analisisnya digunakan analisis nonlinier riwayat waktu. Melalui analisis struktur kemudian dibandingkan pengaruh rasio fleksibilitas dua struktur (T_1/T_2) terhadap frekuensi kontak serta gaya kontak maksimum yang terjadi.

Modelisasi struktur

Struktur dimodelkan dengan menggunakan elemen *frame* berupa kolom dengan geometri seperti pada Gambar 4 sebagai berikut.

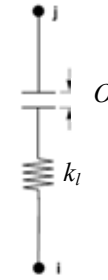


Gambar 4. Pemodelan 2 kolom dengan elemen kontak pada puncak kolom

Modelisasi kontak dan eksitasi

Pada program SAP 2000, problem benturan antara dua massa dimodelkan dengan menggunakan elemen kontak. Elemen ini hanya bekerja saat terjadi kontak antar 2 elemen struktur. Elemen kontak hanya meninjau

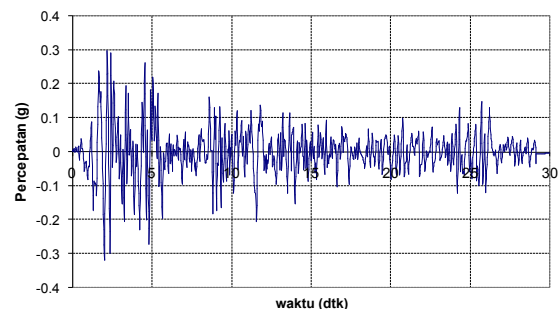
deformasi aksial akibat benturan sehingga output gaya dalam hanya berupa gaya normal aksial tekan (*compression only*).



Gambar 5. Modelisasi elemen kontak untuk deformasi aksial

Nilai bukaan (*open*) disesuaikan dengan celah struktur kemudian nilai kekakuan (k_1) ditentukan berdasarkan kekakuan struktur yang berdekatan. Namun, perlu diperhatikan nilai kekakuan elemen kontak ini tidak perlu diambil terlalu besar karena dapat menyebabkan permasalahan numerik saat dianalisis. SAP 2000 membatasi nilai yaitu diambil tidak lebih besar dari 50 sampai 10000 kali kekakuan struktur yang berdekatan. Nilai kekakuan kolom terfleksibel berkisar 1 kN/m sehingga untuk penyederhanaan pada kajian ini nilai k diambil sebesar 100 kN/m untuk semua model struktur.

Pada kajian digunakan eksitasi berupa riwayat percepatan gempa *El-Centro* komponen N-S seperti terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Riwayat percepatan gempa *El-Centro* komponen N-S

HASIL DAN ANALISIS

Rasio periode alami kolom

Perbandingan fleksibilitas struktur dilakukan dengan membandingkan periode alami dua kolom yang berdekatan. Dengan menggunakan asumsi struktur berperilaku sebagai sistem berderajat kebebasan tunggal,

maka diperoleh rasio periode alami (T_i/T_j) seperti yang diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rasio periode alami kolom

| Model | Dimensi (m) | | T_1 (detik) | T_2 (detik) | T_i/T_j |
|-------|-------------|------------|------------------|------------------|-----------|
| | Kolom 1 | Kolom 2 | | | |
| 1 | 0.4 x 0.2 | 0.6 x 0.2 | 0.196 | 0.065 | 0.33 |
| 2 | 0.4 x 0.2 | 0.45 x 0.2 | 0.196 | 0.087 | 0.44 |
| 3 | 0.4 x 0.2 | 0.3 x 0.2 | 0.196 | 0.131 | 0.67 |
| 4 | 0.4 x 0.2 | 0.4 x 0.19 | 0.196 | 0.206 | 0.95 |

Catatan: rasio periode alami direferensikan terhadap nilai periode yang lebih tinggi.

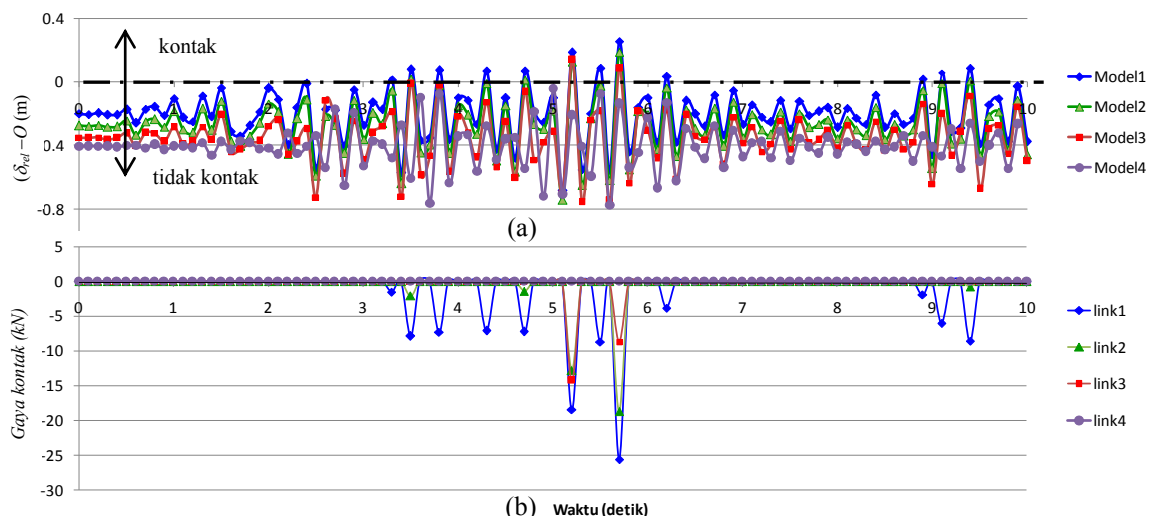
Riwayat simpangan relatif

Salah satu parameter penting dalam problem kontak dua buah kolom yaitu besarnya perbedaan simpangan relatif yang terjadi terhadap celah dua struktur ($\delta_{rel}-O$). Gambar 7a memperlihatkan riwayat perbedaan simpangan relatif terhadap celah struktur. Berdasarkan Gambar 7a, terlihat bahwa model 1 dengan rasio periode alami terendah (0,33 detik) memberikan nilai perbedaan simpangan relatif terhadap celah struktur yang terbesar (0,26 m) dibandingkan 3 model lainnya. Hal ini dapat menggambarkan kemungkinan kontak yang terjadi lebih besar dibanding 3 model lainnya. Kemudian pada model 4 dengan rasio periode alami yang hampir mendekati 1 memberikan nilai perbedaan simpangan relatif terhadap celah struktur yang kesemuanya bernilai negatif (tidak kontak).

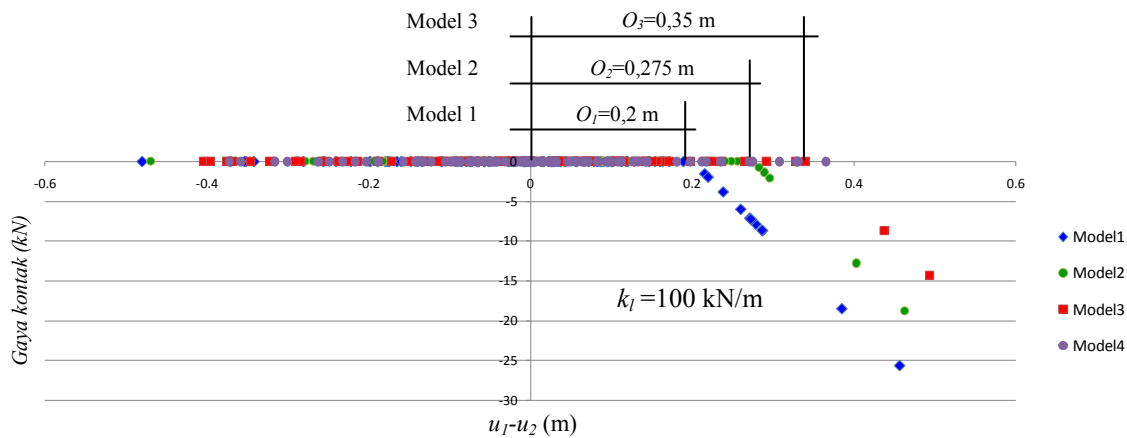
Riwayat gaya kontak

Gaya kontak terjadi jika perbedaan simpangan relatif terhadap celah struktur memiliki nilai positif sesuai Persamaan 1. Sehingga dapat dikatakan terjadi kontak jika grafik pada Gambar 7a berada di atas sumbu x (sumbu positif). Kemudian Gambar 7b menunjukkan riwayat gaya kontak yang terjadi yang tentunya harus sesuai dengan riwayat simpangan relatif pada Gambar 7a. Berdasarkan Gambar 7b dapat diperlihatkan bahwa model 1 dengan rasio periode alami terendah memiliki frekuensi kontak yang terbesar yaitu sebesar 12 kali kontak selama 10 detik masa pembebanan kemudian disusul dengan model 2 dan 3 masing-masing dengan 5 dan 2 kali kontak. Adapun model 4 tidak mengalami kontak selama pembebanan oleh karena perbedaan simpangan relatif terhadap celah struktur memiliki nilai negatif.

Besarnya gaya kontak maksimum yang terjadi juga menunjukkan bahwa model 1 memiliki nilai terbesar yaitu sebesar 25,64 kN, kemudian disusul dengan model 2 dan 3 masing-masing sebesar 18,73 kN dan 14,30 kN. Hal ini menunjukkan struktur dengan rasio periode alami yang rendah lebih rentan terhadap fenomena *pounding* dibandingkan struktur dengan rasio periode alami yang mendekati 1.



Gambar 7. Riwayat perbedaan simpangan relatif terhadap celah ($\delta_{rel}-O$) pada tiap model struktur (a) dan riwayat gaya kontak pada tiap model struktur (b).



Gambar 8. Hubungan simpangan relatif (u_1-u_2) terhadap gaya kontak

Hubungan simpangan relatif terhadap gaya kontak

Bila simpangan relatif (u_1-u_2) dihubungkan terhadap gaya kontak maka akan diperoleh grafik seperti pada Gambar 8. Grafik tersebut sesuai dengan model elemen pegas linier (Gambar 1) dimana gaya kontak terjadi saat simpangan relatif (u_1-u_2) memiliki nilai lebih besar dari celah struktur (O). Kemiringan yang dibentuk antara simpangan terhadap gaya kontak menggambarkan kekakuan sebesar 100 kN/m sesuai asumsi pemodelan. Berdasarkan Gambar 7b dan Gambar 8 dapat terlihat juga bahwa gaya kontak dengan nilai pada rentang 1 hingga 10 kN memiliki frekuensi terbesar.

PEMBAHASAN

Pendekatan elemen kontak dengan menggunakan model pegas linier cukup representatif untuk mensimulasi pengaruh rasio periode alami struktur terhadap frekuensi kontak. Melalui simulasi dapat ditunjukkan bahwa struktur dengan rasio periode alami rendah (dibawah 0,5) memiliki kemungkinan terjadi kontak atau benturan saat terjadi gempa. Hal ini sebetulnya sesuai dengan ketentuan pada AASHTO Guide Specification for LRFD Seismic Bridge Design 2011 yang menspesifikasikan bahwa rasio periode alami struktur baik dalam arah memanjang atau melintang minimum sebesar 0,7. Hal tersebut menunjukkan bahwa ketentuan AASHTO tersebut memberikan hasil yang lebih aman.

Dalam kaitannya untuk perencanaan struktur, perlu dipertimbangkan pembesaran respon gaya akibat benturan yang besarnya

dapat mencapai puluhan atau bahkan ratusan kali gaya rencana. Besarnya pembesaran sangat tergantung pada rasio periode alami, kekakuan benturan, ataupun pada massa struktur yang berdekatan.

Hal yang menjadi catatan pada kajian ini adalah walaupun analisis yang digunakan pada studi ini adalah analisis nonlinier riwayat waktu namun respon yang diperoleh adalah linier karena elemen kontak yang digunakan adalah elemen pegas linier. Sehingga dapat dikatakan digunakannya analisis nonlinier adalah karena problem yang dianalisis adalah problem nonlinier.

Kekakuan yang diasumsikan pada elemen kontak sebesar 100 kN/m adalah untuk mengantisipasi problem numerik saat dilakukan analisis struktur. Namun demikian, perlu untuk dilakukan kajian untuk menentukan nilai kekakuan elemen kontak yang dapat berespon nonlinier dan berubah seiring dengan waktu.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari studi ini adalah sebagai berikut :

1. Model pegas linier dapat digunakan untuk mensimulasi problem kontak dua struktur yang berdekatan.
2. Struktur yang berdekatan dengan rasio periode alami rendah lebih rentan terhadap benturan bila terjadi gempa.
3. Gaya kontak maksimum yang diperoleh lebih besar untuk struktur dengan rasio periode alami rendah.

Saran

Adapun saran yang dapat diambil dari studi ini adalah sebagai berikut :

1. Perlu dilakukan kajian lebih lanjut mengenai asumsi kekakuan saat terjadi kontak dua struktur yang aktual.
2. Untuk keperluan perencanaan, sebaiknya digunakan ketentuan AASHTO dengan rasio periode alami minimum sebesar 0,7.

DAFTAR PUSTAKA

- American Associations of Highway and Transportation Officials. 2011. *Guide Specification for LRFD Seismic Bridge Design*, 2nd Edition. Washington, DC.: AASHTO.
- Anagnostopoulos, S.A. 1988. "Pounding of Buildings in Series during Earthquakes," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 16:443 – 456.
- Earthquake Engineering Research Institute (EERI). 1995a. "Northridge earthquake reconnaissance report, Vol. 1." Rep. No. 95-03.EERI. Oakland: Calif.
- Jankowski R. 2004. "Non-Linear Modelling of Earthquake Induced Pounding of Buildings". *Earthquake Engineering Structural Dynamics* 34:595–611.
- Jennings, P. C. 1971. "Engineering features of the San Fernando Earthquake of February 9, 1971.", Calif. Inst. of Tech. <http://resolver.caltech.edu/CaltechEERL:1971.EERL-71-02>.
- Maison, B. F., and Kasai, K. (1990a). "Analysis for Type of Structural Pounding," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 116(No. 4): pp. 957 - 975.
- Maison, B. F., and Kasai, K. 1992. "Dynamics of pounding when two buildings collide." *Earthquake Engineering Structural Dynamics* 21, 771–786.
- New Zealand National Society for Earthquake Engineering 1990. *The Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989*. New Zealand: NZNSEE.
- Sukmara, G. 2009. *Laporan Pemeriksaan Jembatan Layang Pasupati*. Bandung: Pusjatan.
- Susendar M., Des Roches R. 2002. "Effect of Pounding and Restraints on Seismic Response of Multiple-Frame Bridge". *Journal of Structural Engineering*, Vol 128 : pp. 860 – 869.
- Szuladzinski, G. 1982. *Dynamics of Machinery*. New Jersey: John Wiley & Sons.