



DAKTILITAS PILAR JEMBATAN UNTUK MENJAMIN KESELAMATAN STRUKTUR JALAN RAYA

Lanneke Tristanto

RINGKASAN

Teknologi perencanaan tahan gempa dari struktur jalan raya perlu dikaji agar tidak terjadi kerusakan jaringan transportasi pada kejadian gempa besar. Perencanaan tahan gempa berdasarkan prinsip daktilitas, perilaku elasto plastis dan pembentukan sendi plastis sebagai lokasi penyerap gempa selama ini diandalkan untuk membatasi kerusakan gempa di bagian sendi plastis dari struktur. Pembentukan sendi plastis dan harapan penyerapan gempa di lokasi sendi plastis tidak selalu terjadi secara sempurna selama gempa besar. Ternyata banyak jembatan baru dengan desain tahan gempa sebagai struktur daktil telah mengalami keruntuhan selama kejadian gempa besar akhir ini di beberapa negara termasuk di Indonesia.

SUMMARY

Seismic design technology of road facility structures has to be developed in preventing damage of the transportation network during strong earthquakes. Earthquake resistant design based on the ductility principle, elasto plastic behaviour and formation of plastic hinges as seismic absorbers has been applied in restricting the earthquake damage at the plastic hinge sections of the structure. Plastic hinge formation and anticipated energy absorbing at plastic hinge locations are not satisfactorily proved during strong motion earthquakes. A fact is that new bridges with earthquake resistant design and ductile system have failed during recent strong earthquakes in several countries including Indonesia.

I. PENDAHULUAN

Perencanaan konvensional untuk struktur tahan gempa didasarkan pada pendekatan semi-statis yang dianggap model dari efek dinamis yang sebenarnya terjadi pada gerakan gempa. Dengan tersedianya perangkat lunak maka muncul banyak ragam model, sehingga analisis dinamis diharapkan menjadi andalan desain. Hal ini dibenarkan selama analisis dinamis dianggap sebagai salah satu cara desain yang umum.

Pendekatan dinamis yang mendasar untuk perhitungan tahan gempa adalah membuat model dari sistem struktur dan mengerjakan pada dasar model tersebut suatu gempa dengan ketergantungan waktu berdasarkan data pengukuran gempa aktual.

Untuk bagian struktur yang penting di mana pertimbangan keamanan menjadi utama, seperti pilar jembatan layang dan menara dari jembatan gantung atau jembatan cable-stay, mungkin perlu dijamin agar gempa tidak menyebabkan tegangan dalam

daerah plastis. Untuk tujuan tersebut pengaruh gempa pada struktur penting akan lebih aman bila diperhitungkan berdasarkan analisis dinamis elastis. Hal ini berarti bahwa struktur tetap utuh pada gempa besar - Gambar 1a - tetapi mungkin terjadi kerusakan setempat pada gempa amat besar - Gambar 1b.

Bagaimana pun untuk struktur konvensional di daerah rawan gempa, analisis dinamis menunjukkan bahwa gaya yang aktual dipikul oleh struktur elastis akan jauh lebih besar dari nilai yang digunakan dalam perhitungan semi-statis. Kesimpulannya adalah bahwa struktur mengalami deformasi plastis selama gempa besar, sehingga kapasitas kerja daerah plastis harus dimasukkan ke dalam model.

Perilaku elasto plastis tersebut di dekati dengan menggunakan faktor daktilitas yaitu perkalian 0,25-0,16 terhadap respons elastis, nilai mana digunakan dalam perhitungan tahan gempa sehingga mengijinkan terjadinya tegangan dalam daerah plastis. Hal ini berarti bahwa akan terjadi kerusakan setempat di sendi plastis struktur pada gempa besar - Gambar 1b - tetapi mungkin terjadi keruntuhan pada gempa amat besar.

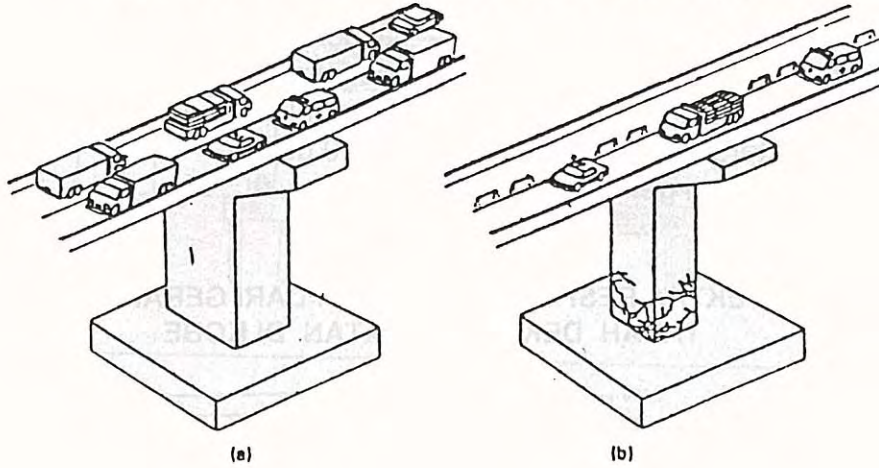
Cara lebih sempurna adalah dengan menggunakan analisis riwayat waktu di mana perilaku dinamis disimulasi sebagai rangkaian tahapan waktu dengan parameter bahan yang bervariasi. Faktor lain yang sangat penting adalah pengaruh kekakuan tanah pada respons struktur. Efek tidak linier dari geometri struktur dan redaman tidak dapat diabaikan juga. Pembuatan model untuk keadaan gempa dengan demikian menjadi

tantangan para perencana. Dalam berbagai hal perlu diperhitungkan pengaruh tanah, struktur, perilaku tidak linier dari bahan, efek tidak linier dari geometri struktur. Model tersebut menjadi mahal dan masih tidak teliti. Kemajuan dalam perencanaan tahan gempa umumnya diperoleh dari pengamatan bangunan-bangunan yang pernah mengalami gempa besar. Demikian model analitis mempunyai peranan penting tetapi batasannya harus tetap ditinjau.

Pengaruh gempa pada struktur serupa dengan suatu beban ledakan dengan tekanan awal yang meningkat dalam waktu sangat singkat dan kemudian menghilang sampai nol dalam waktu t . Umumnya dianggap bahwa laju pengurangan tekanan adalah linier. Respons struktur tergantung pada relatif t terhadap periode alami struktur T . Bila t lebih kecil dari T maka struktur tidak mempunyai waktu untuk mengadakan respons terhadap beban gempa secara penuh, dan bila t jauh lebih besar dari T maka respons struktur serupa dengan keadaan pembebanan statis.

Perilaku setempat perlu diperhitungkan karena bagian-bagian struktur dapat memberi respons terhadap gempa yang jauh berbeda dari bentuk respons keseluruhan struktur. Konsep anggapan struktur atau bagian struktur sebagai massa tunggal pada sistim per sesuaian untuk beban singkat seperti gempa. Per tidak tetap elastis dan umumnya bersifat elasto-plastis, sehingga daktilitas per merupakan parameter terpenting dalam tingkat keselamatan struktur.

Gambar 1.
DESAIN TAHAN GEMPA CARA ELASTIS (a)
DIBANDINGKAN CARA ELASTO PLASTIS (b).

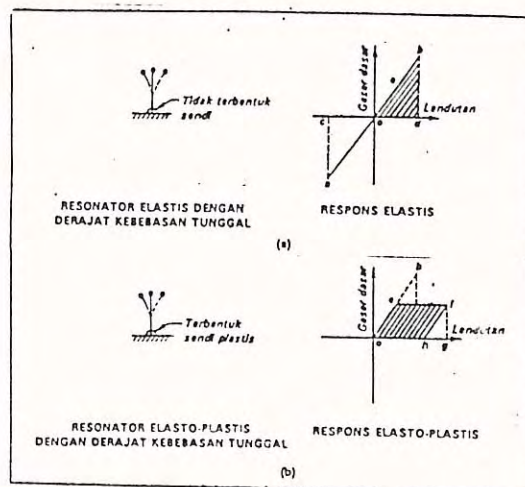


II. DESAIN PILAR ELASTIS TERHADAP ELASTO PLASTIS

Perbedaan mendasar antara desain elastis dan elasto plastis terletak pada anggapan respons seismik elastis linier dan plastis

bilinier - Gambar 2. Perencanaan harus memilih antara desain elastis yang mahal tetapi sepenuhnya tahan gempa dan desain elasto plastis yang ekonomis tetapi sebagian tahan gempa.

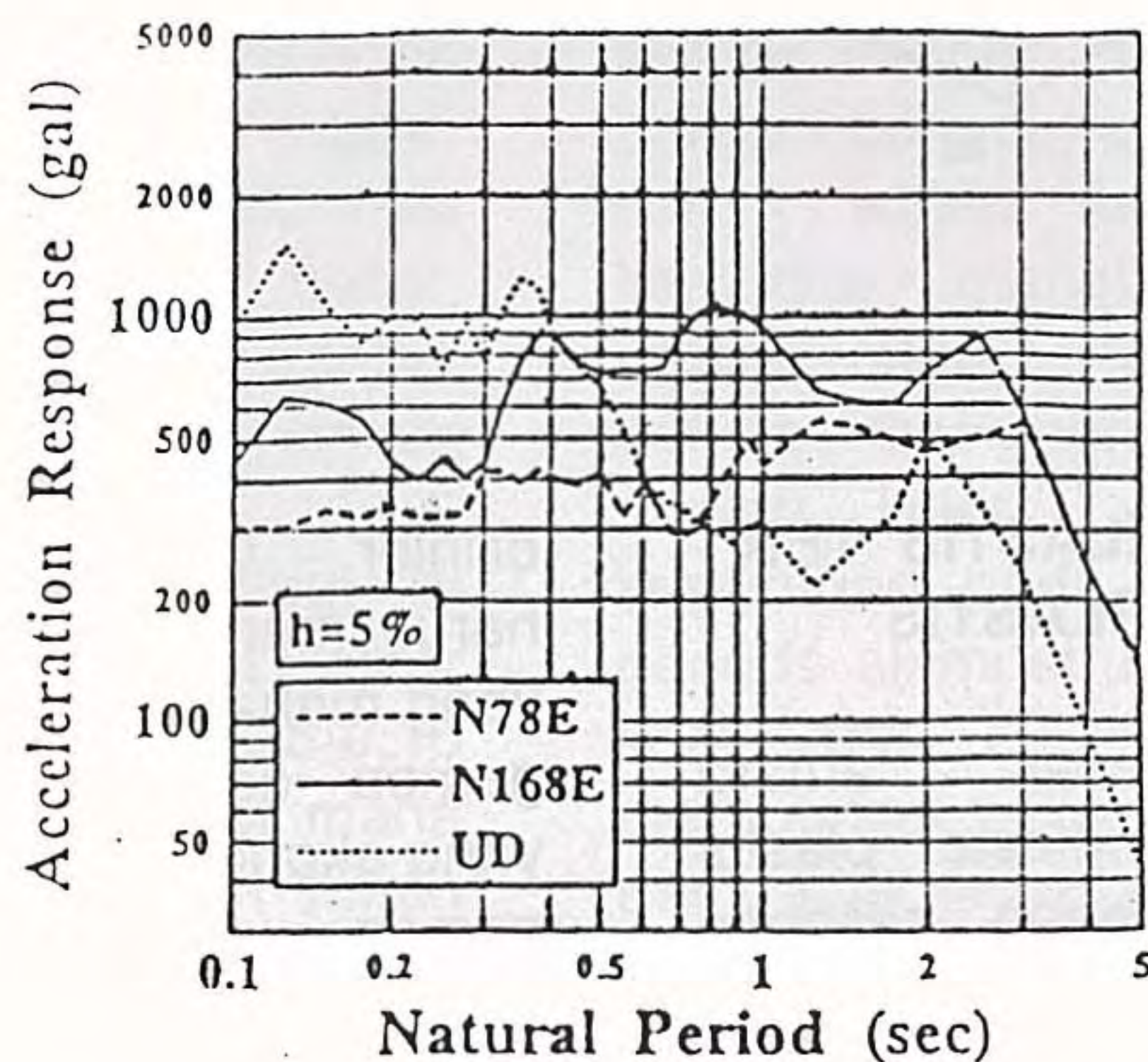
Gambar 2.
RESPONS ELASTIS DIBANDING ELASTO PLASTIS
UNTUK DESAIN PILAR JEMBATAN



Dalam desain tahan gempa dianggap bahwa gaya ekuivalen statis sebagai simulasi gempa rencana merupakan gaya ultimit pada struktur sehingga diperhitungkan secara plastis. Hal ini berarti bahwa diharapkan tidak terjadi gempa lebih besar dari keadaan ultimit tersebut. Kenyataan bahwa mungkin terjadi gempa di atas

ultimit menjadi sebab keruntuhan jembatan pada gempa sangat besar seperti yang pernah terjadi di Kobe - Gambar 3 - di mana respon akselerasi dari gerakan tanah di dekat lokasi jembatan yang mengalami kerusakan mencapai 1000 gals.

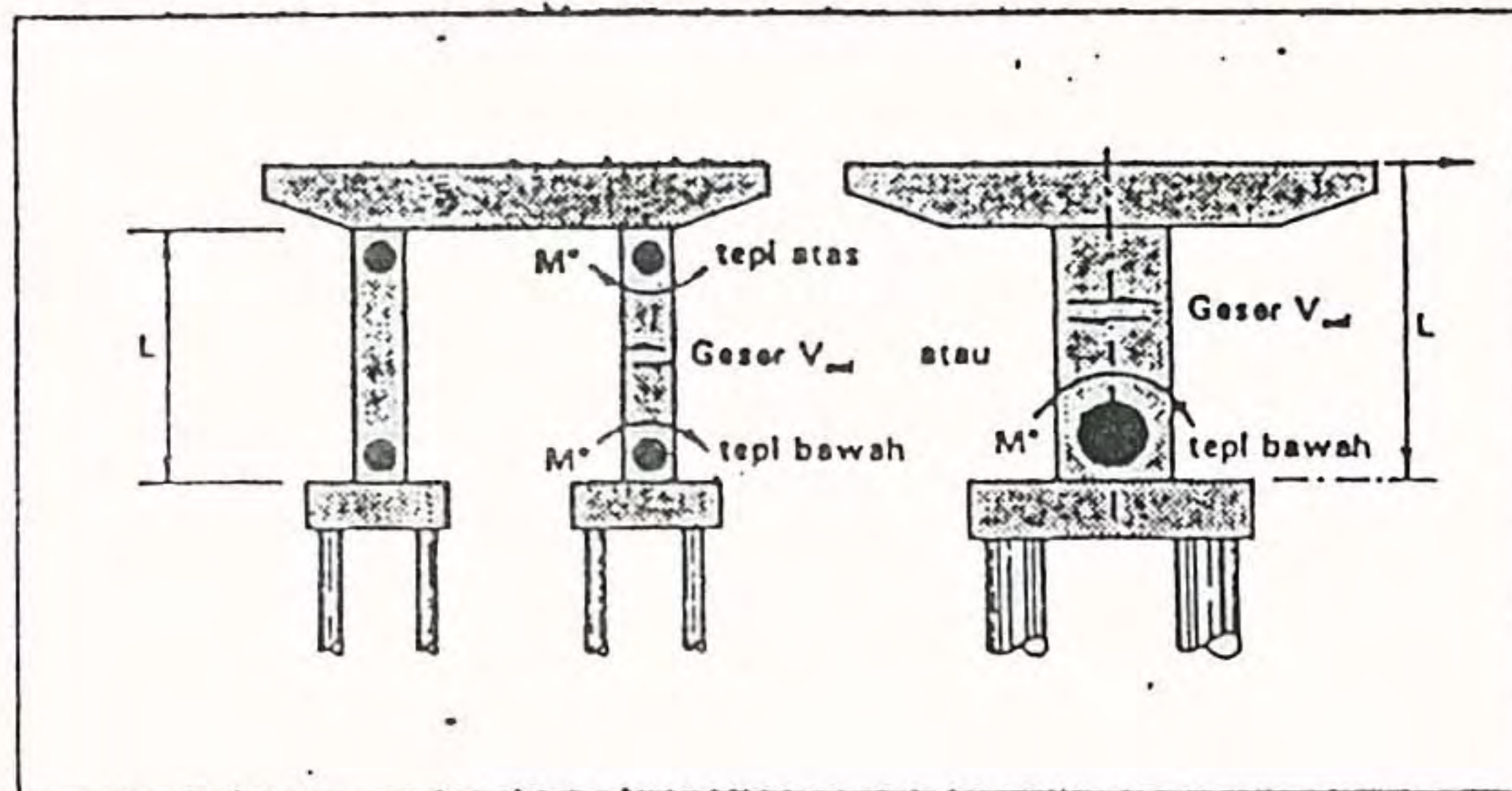
Gambar 3.
SPEKTRA RESPON AKSELERASI DARI GERAKAN TANAH DEKAT JEMBATAN DI KOBE



Sebagai pandangan numerik, penulangan kolom pilar - Gambar 4 - akan memerlukan tulangan utama sebesar 1 % dari luas kolom pada anggapan plastis dibanding 2 % pada anggapan elastis. Dimensi pilar terutama dipengaruhi oleh koefisien seismik horisontal sebesar 0,15 terhadap beban mati struktur pada anggapan struktur plastis daktail dibanding 0,45 pada anggapan

struktur elastis tidak daktail, yang diperhitungkan untuk wilayah gempa no. 4 termasuk Jakarta. Koefisien seismik horisontal k_h diperhitungkan sebesar $C.S$, di mana C merupakan koefisien geser dasar untuk wilayah gempa, periode getar struktur dan kondisi tanah, dan S merupakan faktor tipe struktur yaitu 1 untuk struktur daktail dan 3 untuk struktur tidak daktail.

Gambar 4.
LOKASI SENDI PLASTIS PADA PILAR



Bila desain pilar tahan gempa disesuaikan dengan spektra respon gempa aktual di Kobe - Gambar 3 - akan diperoleh untuk periode getar T pilar antara 0,2 - 0,5 detik (sebagai contoh numerik dari T pilar arah melintang dan memanjang) suatu respon akselerasi S_a sebesar 1000 gals yang menghasilkan koefisien geser dasar C melalui rumus $(S_a/g) \cdot D_s$, di mana D_s merupakan faktor daktilitas rata-rata sebesar 0,25 untuk konstruksi beton dan baja dengan gravitasi g sebesar 1000 gals. Demikian koefisien seismik horisontal k_h menjadi 0,25 untuk anggapan struktur daktail dan 0,75 untuk anggapan struktur tidak daktail. Nilai k_h sebesar 0,75 akan menjamin struktur tetap utuh pada gempa besar dan hanya rusak di bagian sendi plastis pada gempa amat besar. Nilai koefisien seismik horisontal yang aktual diperlukan menurut data Kobe ternyata jauh melebihi k_h sebesar

0,45 yang berlaku untuk daerah Jakarta menurut Peraturan Beban yang berlaku, tetapi belum dapat di verifikasi dengan pengukuran respon aktual. Dengan demikian terlihat bahwa data yang mutlak diperlukan untuk desain tahan gempa statis ekuivalen yang lazim digunakan adalah akselerogram dengan spektra respon dari gempa setempat. Selama ini data gempa di Indonesia masih langka dan perhitungan tahan gempa harus memacu pada data luar negeri yang jelas berbeda dengan kondisi di dalam negeri.

Peraturan Beban yang mencakup perencanaan tahan gempa untuk jembatan jalan raya menggunakan data respon dari California dengan anggapan faktor daktilitas 0,25, redaman kritis 5 %, tingkat risiko di California, yang di modifikasi berdasarkan periode ulang gempa 500 tahun dalam 6 wilayah gempa di Indonesia - Tabel 1.

Tabel 1.
DASAR PERATURAN TAHAN GEMPA UNTUK JEMBATAN JALAN RAYA
DI INDONESIA

Wilayah gempa Indonesia	Akselerasi batuan-bedrock	Akselerasi permukaan amplifikasi 0.67-1.50	Koefisien geser dasar C
1	600 gals	400 - 900 gals	0.20 - 0.23
2	500 gals	330 - 750 gals	0.17 - 0.21
3	400 gals	270 - 600 gals	0.14 - 0.18
4 (JKT)	300 gals	200 - 450 gals	0.10 - 0.15
5	200 gals	130 - 300 gals	0.12
6	100 gals	65 - 150 gals	0.07

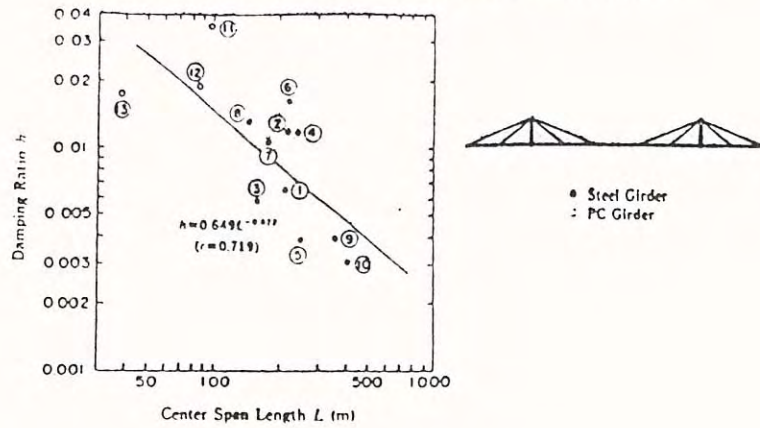
Redaman kritis sebesar 5 % umum berlaku untuk struktur beton dan baja seperti pilar, pangkal dan gelagar jembatan yang menggunakan konstruksi kaku. Bila peraturan tahan gempa diterapkan pada struktur fleksibel seperti jembatan gantung dan cable stay maka tetap dapat digunakan cara statis ekuivalen dengan syarat modifikasi koefisien gempa horisontal berdasarkan redaman aktual dari struktur kabel yang sering lebih kecil dari 1%. Redaman yang kecil dari struktur kabel menyebabkan respon struktural yang lebih besar sehingga sering harus dilengkapi dengan sistem peredam di titik simpul kabel maupun di perletakan. Dengan demikian selain akselerogram juga diperlukan periode getar dan nilai redaman dari struktur kabel yang hanya dapat diperoleh melalui tes eksitasi - getar vertikal pada jembatan tersebut. Untuk struktur kompleks seperti jembatan gantung dan cable stay

yang umumnya merupakan bentang panjang di atas 200 m dapat digunakan beberapa rumus eksperimental yang dikembangkan oleh PWRI Jepang berdasarkan tes getar pada jembatan kabel yang terbatas jumlahnya di Jepang sendiri. Tes getar dilakukan dengan beban eksitasi yang lebih kecil dari beban gempa dan sering digunakan alat perekam microtremor, tetapi tes aktual tersebut dapat memberikan parameter dinamis sebagai pendekatan keadaan gempa aktual.

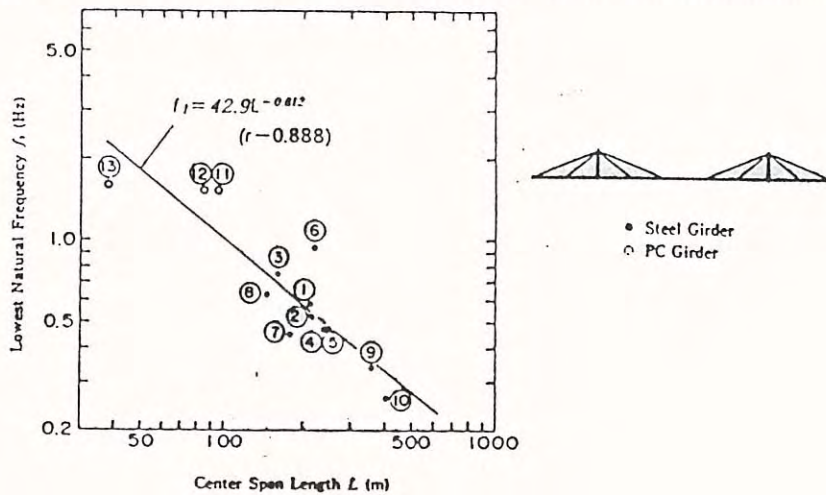
Sebagai penjelasan diberikan beberapa rumus pendekatan untuk tipe jembatan cable stay yang diteliti oleh PWRI Jepang sebagai berikut : Redaman kritis $h = 0,649 L^{-0,822}$ di mana L merupakan bentang tengah utama dalam m - Gambar 5 - dan Frekuensi natural minimum :

$$f_1 = 42,9 L^{-0,812} \text{ - Gambar 6.}$$

Gambar 5
 RASIO REDAMAN RATA-RATA UNTUK SEMUA ARAH
 SEBAGAI FUNGSI L BENTANG TENGAH



Gambar 6
 FREKUENSI NATURAL MINIMUM SEBAGAI FUNGSI BENTANG TENGAH



Modifikasi respon struktural untuk berbagai tingkat redaman dapat di dekati dengan rumus PWRI Jepang berikut :

$S_{a,h} = S_{a,h=5\%} [\{ 1,5 / (40 h + 1) \} + 0,5]$
 yang menghasilkan respon 1,5 kali terhadap kondisi $h = 5\%$ bila h menjadi 1% seperti pada struktur kabel. Gempa vertikal di dalam Peraturan Beban kurang diperhatikan

dan diperhitungkan dengan koefisien gempa vertikal rata-rata sebesar 0.10. Setelah kejadian gempa Kobe di mana akselerasi gempa arah vertikal melebihi gempa arah horisonta, maka koefisien gempa vertikal seharusnya minimal sama dengan koefisien gempa horisonta selain tidak boleh lebih kecil dari 1.10. Terjatuhnya gelagar bangunan atas dari perletakan terutama

disebabkan karena gerakan gempa yang mengangkat dan memindahkan gelagar dari kedudukan perletakan di pilar dan pangkal jembatan

III. KESIMPULAN

Jembatan umumnya diperhitungkan terhadap gaya vertikal dan horisontal misalnya beban gandar dan gaya rem kendaraan yang bekerja dalam arah memanjang jembatan sehingga jembatan dapat menahan gempa kecil tanpa terjadi kerusakan berarti. Dengan terbatasnya data gempa aktual di Indonesia maka diperlukan formulasi keamanan dalam desain jembatan sehingga menjamin keselamatan struktur jalan raya pada kejadian gempa besar dan sangat besar. Dengan demikian terdapat beberapa segi yang perlu diperhatikan dalam perencanaan tahan gempa sebagai berikut :

1. Daktilitas tidak selalu menjamin keselamatan, sehingga penerapan desain daktail, daktail sebagian atau tidak daktail, menjadi pertimbangan teknis untuk para perencana.
2. Antisipasi dan kemungkinan untuk gempa horisontal maupun vertikal yang lebih besar dari yang direncanakan harus dipertimbangkan dalam desain.
3. Pilihan antara tipe perletakan yang sesuai untuk tahan gempa - elastomere yang mudah berubah tanpa merusak gelagar jembatan, rol atau sendi baja yang mengalami perubahan bentuk sambil membawa gelagar jembatan serta perlengkapan untuk mencegah jatuhnya gelagar dari perletakan akibat gempa horisontal dan vertikal perlu diintensifkan dalam peren-

canaan baru dan perkuatan tahan gempa pada jembatan lama.

4. Perlu dipikirkan rute dan jalan alternatif yang akan berfungsi sebagai pengganti jalan yang rusak akibat gempa sehingga usaha penyelamatan tidak terhalang oleh putusnya akses ke tempat bencana.

DAFTAR PUSTAKA

1. Iain A. Macleod - Analytical Modelling of Structural Systems - Ellis Horwood Ltd - England 1990
2. Kazuhiko Kawashima - Lecture Note on Earthquake Engineering related with Seismic Design of Dams - Course on Earthquake Engineering and Soil Dynamic - JICA - Bandung 1984
3. Kazuhiko Kawashima, Koh Aizawa, Kazuyuki Tahahashi - Attenuation of Peak Ground Motion and Absolute Acceleration Response Spectra - PWRI - Japan 1984
4. Kazuhiko Kawashima, Sigeki Unjoh, Meguru Tsunomoto - Damping Characteristics of Cable Stayed Bridges for Seismic Design - Journal of Research PWRI - Japan - Dec. 1991
5. Takashi Iijima, Tomonubo Nakaoka, Yasuyuki Koga - The 1995 Hyogoken Nanbu Earthquake - PWRI Japan 1995.
6. Peraturan Beban Jembatan-Bridge Design Codes and Manuals-BMS-Bina Marga 1992.

Penulis :

Ir. Lanneke Tristanto, Ajun Peneliti Bidang Konstruksi Bangunan Pelengkap Jalan, Pusat Litbang Jalan.