

Analisa Kekakuan Peredam Histerisis Baja Berbentuk U Akibat Pembebanan Berulang

Eka Satria^{1,*}, Lovely Son¹ dan Hanif Muzhaffar Rafi¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Universitas Andalas - Padang

*Korespondensi: ekasatia@ft.unand.ac.id

Abstrak. Makalah ini adalah bagian dari penelitian yang bertujuan untuk memperbaiki metode perancangan struktur atap suatu bangunan pada daerah rawan gempa. Tujuan akhir yang ingin dicapai adalah diperolehnya struktur atap yang kuat, ekonomis dan aman. Jika pada penelitian sebelumnya, faktor kekuatan dan keekonomisan konstruksi telah berhasil ditingkatkan dengan penerapan konsep-konsep optimasi, maka pada makalah ini, fokus diarahkan untuk meningkatkan keamanan struktur, yaitu dengan menawarkan penggunaan peredam histerisis baja berbentuk-U dalam mengontrol perpindahan struktur untuk menghindari kerusakan besar pada struktur atap ketika gempa terjadi sehingga korban jiwa dapat diminimalkan. Untuk mencapai tujuan ini, suatu bentuk peredam baja berbentuk U dimodelkan secara numerik untuk kemudian dianalisa dengan suatu program komputasi in-house yang dikembangkan berdasarkan konsep metode elemen hingga yang telah melibatkan faktor ketidaklinearan geometri dan material. Model tersebut kemudian dibebani dengan beban berulang dalam arah horizontal maupun vertikal. Hasil akhir yang diharapkan adalah diperolehnya suatu kurva histerisis beban-perpindahan satu *cycle* dari peredam baja berbentuk U tersebut akibat pembebanan berulang. Dari kurva ini dapat diketahui kekakuan struktur dalam arah horizontal maupun vertikal serta kekuatan maksimum dari struktur dalam berbagai bentuk variasi geometri. Hasil ini selanjutnya bisa digunakan sebagai parameter-parameter dasar dalam analisa dinamik struktur ruang yang menggunakan peredam histerisis untuk mengontrol perpindahannya ketika dikenai beban seismik.

Kata kunci: peredam histerisis baja berbentuk U, metode elemen hingga, beban berulang, kekakuan

©2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Makalah ini membahas salah satu usaha perbaikan dalam perancangan struktur ruang untuk daerah rawan gempa. Beberapa usaha perbaikan yang telah dilakukan adalah pertama, menerapkan teknik pencarian bentuk dalam menurunkan tegangan kritis struktur melalui perubahan bentuk geometri struktur [1, 2]. Kedua, menerapkan teknik penyesuaian dimensi dalam menentukan ukuran batang/pipa penyusun struktur ruang sehingga biaya lebih ekonomis [3]. Ketiga, penerapan T-joint strut pada struktur untuk membuat ketinggian atap sekaligus penyerap energi ketika gempa besar terjadi [4].

Pada penelitian kali ini akan diperkenalkan penggunaan peredam histerisis baja dalam mereduksi perpindahan dan sekaligus mampu menyerap energi akibat beban gempa. Peredam ini disusun dari dua atau lebih pelat baja berbentuk U, yang kemudian dipasang di beberapa tempat antara struktur atap dan struktur penopang bangunan.

Studi pertama telah dilakukan untuk melihat karakteristik mekanik pelat-U yang dibebani beban *cyclic* dalam berbagai variasi geometri untuk menentukan model yang memiliki energi dissipasi yang paling besar melalui penerapan teknik elemen hingga. Parameter-parameter mekanik yang dihi-

tung seperti kekakuan, beban maksimum dan energi dissipasi hanya dihitung dalam arah horizontal, sementara dalam arah vertikal diabaikan. Kemudian untuk melihat kelayakan pelat U ini dalam mereduksi perpindahan akibat beban gempa, sebuah model pegas-massa sederhana 2-DOF digunakan dengan kekakuan dan redaman yang diperoleh dari analisa sebelumnya. Hasil yang diberikan memperlihatkan pelat baja-U ini cukup layak dijadikan sebagai peredam pada bangunan akibat gempa [5].

Makalah ini merupakan lanjutan dari studi pertama di atas dengan menggunakan model peredam yang merupakan gabungan dari dua atau lebih pelat baja-U. Parameter mekanik dihitung dalam dua arah pembebanan; horizontal dan vertikal. Hasil yang diberikan adalah perbandingan harga parameter-parameter mekanik tersebut dalam 4 variasi model peredam. Tujuan akhirnya adalah mendapatkan peredam yang mampu mereduksi perpindahan sekaligus mampu menyerap energi

Tinjauan Pustaka

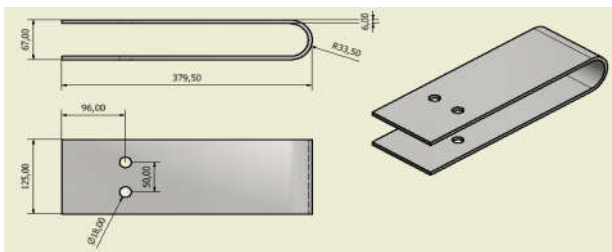
Beberapa penelitian pendahuluan telah dilakukan terkait dengan mekanisme peredam dan penyerap energi pada struktur bangunan. Berbagai model telah diperkenalkan seperti pendulum isolator [6], lead rubber bearing [6], viscous damper

[7], friction damper [8, 9]. Seluruh model-model tersebut umumnya digunakan oleh struktur bangunan dengan tujuan untuk mereduksi perpindahan akibat beban gempa. Beberapa penelitian yang fokus untuk membuat mekanisme yang mampu menyerap energi juga telah diperkenalkan seperti Ref.[10] yang memperkenalkan konsep struktur bracing pada bangunan penopang yang dirancang untuk mengalami peluluhan sehingga dapat menyerap energi gempa. Penelitian ini dilanjutkan oleh Ref.[11] yang menggunakan kombinasi peredam viskos-elastik dan bracing dalam mereduksi perpindahan akibat beban gempa. Ref.[12] memperkenalkan konsep peredam histerisis yang diterapkan pada struktur truss untuk mengontrol kerusakan akibat gempa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peredam seperti ini cukup layak digunakan pada struktur ruang dengan bentangan yang panjang (long span structures). Setelah itu sangat banyak penelitian-penelitian yang dilakukan terkait dengan penggunaan peredam histerisis dalam mengontrol kerusakan akibat gempa.

Pemodelan Numerik

Pelat baja-U yang digunakan pada peredam memiliki dimensi seperti yang diperlihatkan pada gambar 1. Sementara model peredam dibangun dari gabungan dua pelat baja-U atau lebih yang disambungkan ke pelat pemegangnya (gambar 2). Ada 4 model yang diperkenalkan seperti yang diperlihatkan oleh gambar 3 dengan deskripsi sebagai berikut:

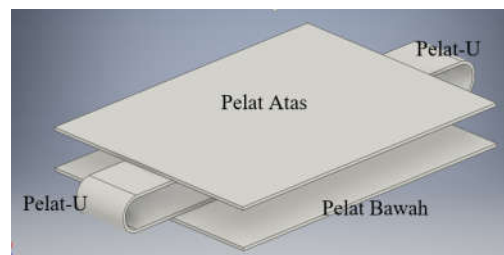
1. Model_01 adalah model peredam dasar yang memiliki dua pelat baja-U yang dipasang pada sisi kiri dan kanan.
2. Model_02 ditujukan untuk menambah kekakuan peredam dalam arah horizontal.
3. Model_03 ditujukan untuk menambah kekakuan dalam arah vertikal.
4. Sedangkan Model_04 meningkatkan nilai perpindahan elastis dari peredam.



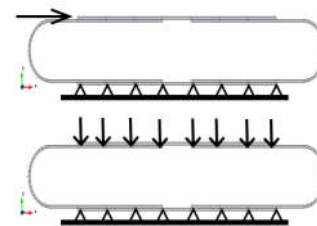
Gambar 1. Geometri pelat baja-U

Sifat material pelat baja-U diperlihatkan oleh tabel 1. Beban diberikan dalam dua arah; horizontal dan vertikal seperti yang diperlihatkan pada gambar 2. Untuk pembebanan dalam arah horizontal, setiap nodal pada pelat atas sisi kiri dibebani dengan suatu

gaya P ke arah kanan. Sementara, untuk pemodelan kondisi batas, seluruh nodal yang terdapat pada permukaan atas pelat atas diberikan tumpuan rol sehingga memungkinkan perpindahan terjadi secara horizontal, sedangkan seluruh nodal yang terdapat pada permukaan bawah pelat bawah dibatasi gerakannya dalam segala arah. Untuk pembebanan dalam arah vertikal, setiap nodal pada pelat atas sisi atas dibebani dengan suatu gaya P ke bawah. Sementara, untuk pemodelan kondisi batas, seluruh nodal yang terdapat pada sisi pelat atas diberikan tumpuan rol sehingga memungkinkan perpindahan terjadi secara vertikal, sedangkan seluruh nodal yang terdapat pada permukaan bawah pelat bawah dibatasi gerakannya dalam segala arah.

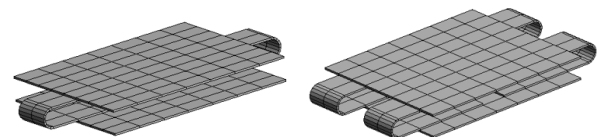


a



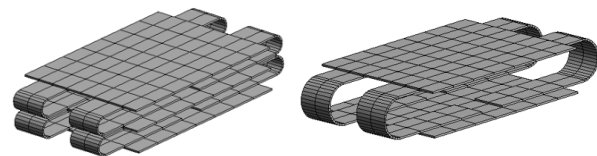
b

Gambar 2. Bagian peredam histerisis baja



a

b



c

d

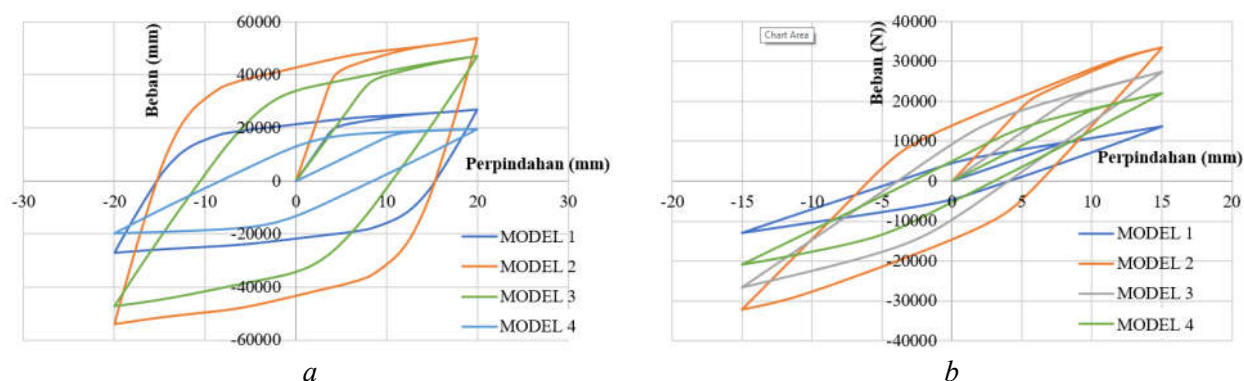
Gambar 3. Model peredam yang digunakan: a) Model_01, b) Model_02, c) Model_03 dan d) Model_04

Tabel 1. Sifat Material

| Parameter | Nilai |
|-------------------------|-----------|
| Modulus Elastisitas | 210 GPa |
| Tegangan Luluh | 270.1 MPa |
| Poison ratio | 0.3 |
| Model tegangan-Regangan | Bilinear |

Tabel 2. Nilai kekakuan elastik, kekuatan maksimum dan energi dissipasi dari peredam

| Model | Kekakuan elastik (N/mm) | | Kekuatan maksimum (N) | | Energi Dissipasi (N.mm) | |
|---------|-------------------------|---------|-----------------------|----------|-------------------------|-----------|
| | sb-x | sb-y | sb-x | sb-y | sb-x | sb-y |
| Model 1 | 4953,84 | 1204,58 | 19741,73 | 9493,44 | 1356423,30 | 147918,23 |
| Model 2 | 9891,07 | 3747,19 | 37980,42 | 20093,89 | 2711176,17 | 546993,55 |
| Model 3 | 4662,07 | 2462,12 | 35455,93 | 20150,45 | 1660198,06 | 333724,34 |
| Model 4 | 1647,56 | 1786,75 | 17394,49 | 18010,55 | 608349,90 | 208461,67 |

**Gambar 4.** Kurva histerisis model-model peredam: a) Arah horizontal dan b) Arah vertikal

Proses penghitungan kekuatan kritis struktur kolom ini dihitung secara numerik dengan memanfaatkan program komputasi in-house [xx] berdasarkan metode elemen hingga yang memperhitungkan ketidaklinearan geometri dan material. Untuk pemodelan, struktur kolom dibuat dengan menggunakan elemen solid *hexahedron* 20 nodal.

Ketidaklinearan geometri dihitung berdasarkan *Updated Langrangian Jaumann* dengan mempertimbangkan perpindahan dan rotasi yang besar. Ketidaklinearan material dihitung berdasarkan teori kriteria luluh *Von Mises*, *Associated Flow Rule*, dan *Hardening Rule* untuk material baja karbon rendah. Sedangkan solusi numerik untuk persamaan kesetimbangan nonlinear diselesaikan dengan metoda pengontrolan perpindahan (*displacement control method*).

Hasil dan Pembahasan

Dengan menggunakan program komputasi berdasarkan metode elemen hingga yang memperhitungkan ketidaklinearan material dan geometri, nilai kekakuan, kekuatan maksimum dan energi dissipasi dari masing-masing model dihitung dalam dua arah pembebanan, horizontal dan vertikal. Untuk mendapatkan kurva histerisis satu siklus, perpindahan pada awalnya diijinkan sampai 20 mm dan setelah itu arahnya diubah menjadi berlawanan sampai dengan -20 mm. Dalam proses penghitungan, gesekan yang terjadi antara pelat baja-U dan pelat datar diabaikan.

Tabel 2 memperlihatkan harga kekakuan elastik dan kekuatan maksimum dari peredam histerisis baja yang dianalisa. Dari tabel 2 diperlihatkan bahwa model 1 sebagai model dasar memiliki kekakuan elastis sebesar 4593 N/mm (dalam arah horizontal) dan 1204 N/mm (dalam arah vertikal) serta kekuatan maksimum 19741 N (dalam arah horizontal dan 9493 N (dalam arah vertikal).

Ada 3 variasi geometri yang dilakukan pada model dasar ini. *Pertama*, dengan menambah jumlah pelat baja-U dalam arah horizontal, seperti yang ditunjukkan oleh Model 2. Hasilnya memperlihatkan nilai kekakuan elastis meningkat menjadi 9891 N/mm (dalam arah horizontal) dan 3747 N/mm (dalam arah vertikal) serta kekuatan maksimum juga meningkat menjadi 37980 N (dalam arah horizontal dan 20093 N (dalam arah vertikal). *Kedua*, dengan menambah jumlah pelat baja-U dalam arah vertikal, seperti yang ditunjukkan oleh Model 3. Jika dibandingkan dengan Model 2, nilai kekakuan elastis dari peredam dengan turun menjadi 4662 N/mm (dalam arah horizontal) dan 2462 N/mm (dalam arah vertikal), akan tetapi kekuatan maksimum peredam dalam arah horizontal dan vertikal tidak terlampau jauh berbeda dengan Model 2, yaitu 35455 N (dalam arah horizontal) dan 20150 N (dalam arah vertikal). Model 3 memiliki tinggi peredam yang lebih besar dari Model 2. Jika tinggi peredam ini dibuat sama, maka tentu saja penambahan jumlah peredam dalam arah vertikal akan menaikkan nilai kekakuan elastis sekaligus kekuatan maksimumnya. *Ketiga*, dengan menambah nilai ketinggian peredam tanpa menambah

jumlah peredam, seperti yang diperlihatkan pada Model 4. Jika dibandingkan dengan Model 2, nilai kekakuan elastis dari peredam turun menjadi 1647 N/mm (dalam arah horizontal) dan 1786 N/mm (dalam arah vertikal) dan nilai kekuatan maksimum dari peredam juga turun menjadi 17394 N/mm (dalam arah horizontal) dan 18010 N/mm (dalam arah vertikal).

Dari perbandingan di atas, Model 2 memiliki nilai kekakuan elastis terbesar yaitu 9891,07 N/mm dalam arah horizontal dan 3747,19 N/mm dalam arah vertikal. Kemudian Model 2 juga memiliki kekuatan maksimum terbesar sebesar 37980 N dalam arah horizontal dan 20093 N dalam arah vertikal. Hanya saja akibat kekakuan yang cukup besar ini, Model 2 hanya memiliki perpindahan elastis maksimum sekitar 4 mm dalam arah horizontal dan 5 mm dalam arah vertikal. Peluluhan mulai terjadi jika perpindahan melewati harga-harga tersebut (lihat gambar 4).

Tabel 2 dan gambar 4 juga memperlihatkan nilai energi dissipasi dari seluruh model peredam. Energi dissipasi adalah jumlah energi beban yang bisa diserap oleh peredam, dalam hal ini adalah melalui proses peluluhan yang terjadi. Semakin besar kemampuan menyerap energi ini diharapkan dapat meminimalkan pengaruh kerusakan yang terjadi akibat gempa. Dari hasil perbandingan, kembali terlihat bahwa Model 2 memperlihatkan besar energi dissipasi terbesar yaitu 2711176 N.mm (dalam arah horizontal) dan 54993 N.mm (dalam arah vertikal). Harga ini dihitung dari luas kurva histerisis yang diberikan oleh gambar 4.

Untuk melihat kelayakan model-model peredam ini dalam mereduksi respon perpindahan akibat beban gempa. Maka sebuah model bangunan 2 DOF diperkenalkan, seperti yang ditunjukkan oleh gambar 5. Dari model bangunan tersebut, diturunkan persamaan differensial gerak sistem sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

dimana m_1 dan m_2 adalah nilai massa struktur pendukung dan struktur atap, kemudian c_1 , c_2 , k_1 and k_2 adalah nilai redaman dan kekakuan dari struktur pendukung dan struktur atap. Beban $f(t)$ adalah suatu beban gempa yang diberikan di tumpuan. Berikut beberapa asumsi yang digunakan dalam proses penghitungan respon struktur atap.

- Frekuensi pribadi massa m_1 dan massa m_2 , diasumsikan sama, $\omega_1 = \omega_2 = 3.14 \text{ rad/s}$

- Rasio redaman dari massa m_1 dan massa m_2 diasumsikan $\xi_1 = 0.01$ dan $\xi_2 = 0.1$.
- Nilai kekakuan peredam (k_2) dihitung dari analisa statik berdasarkan konsep metode elemen hingga (lihat Tabel 2).
- Parameter dinamik lainnya dihitung dengan Pers.(2)-(6) berikut ini:

$$m_2 = k_2 / \omega^2 \quad (2)$$

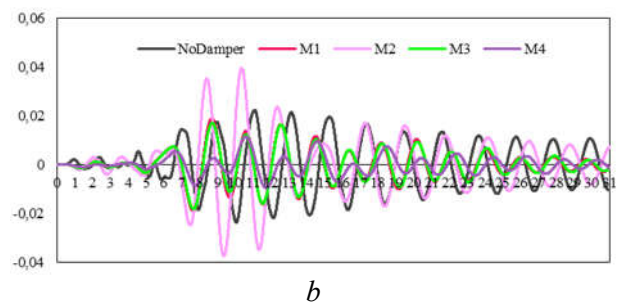
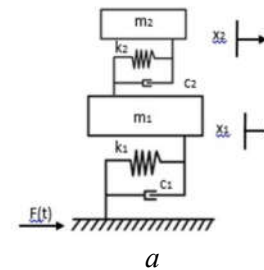
$$c_2 = \xi_2 \times 2 \times \sqrt{k_2 m_2} \quad (3)$$

$$m_1 = 5 \times m_2 \quad (4)$$

$$k_1 = m_1 \times \omega^2 \quad (5)$$

$$c_1 = \xi_1 \times 2 \times \sqrt{k_1 m_1} \quad (6)$$

Beban gempa yang dipilih dalam studi kelayakan ini adalah beban gempa Kobe.



Gambar 5. a) Model struktur bangunan 2 dof, b) Respon perpindahan struktur akibat beban gempa horizontal dalam variasi model peredam

Kesimpulan

Beberapa poin yang dapat disimpulkan dari studi ini adalah:

- Model peredam histeris baja yang dibangun dari beberapa kombinasi pelat baja-U cukup efektif digunakan dalam meredam respon suatu struktur yang dibebani oleh suatu beban seismik.
- Nilai kekakuan elastik dan kekuatan maksimum dari peredam histeris baja dipengaruhi oleh bentuk dan dimensi dari peredam.
- Model 02 menawarkan bentuk peredam dengan kemampuan menyerap energi yang terbesar dibandingkan model-model lain yang diperkenalkan.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas bantuan finansial yang diberikan oleh Kemenristekdikti da-

lam bentuk Hibah Penelitian Fundamental tahun 2017.

Referensi

- [1] Satria, E; Kato, S; Niho, Y; “Form Finding of RC Shells Considering Multiple Design Loads”, International Conference of APCS Nagoya, Japan, 2009.
- [2] Satria, E; Kato, S; Niho, Y; “Perbaikan Metode Perancangan Struktur Atap pada Daerah Rawan Gempa, Jurnal Teknik Mesin Indonesia, Vol.(2) Oktober 2015, BKSTM Indonesia (in Indonesian).
- [3] Niho, Y., Kato, S., Satria, E.; “A Study on a Procedure to Design Light-Weight Latticed Shells with High Strength”, International Conference of IASS, Shanghai-China, November, 2010.
- [4] Satria, E., Kato, S., Nakazawa, S., Kakuda, D., “Study on Dynamic Behavior of a New Type of Two-Way Single Layer Lattice Dome with Nodal Eccentricity”, Steel and Composite Structures, An International Journal, December, Vol.8 No.6, pp.511-530, 2008
- [5] Satria, E., Son, L; Haris; S; Saputri R.; “Static and Dynamic Analysis of Steel U-Damper for Space Structures”. 4th International Conference on Earth Science and Engineering (ICEE), 29th-31st August, 2017, Padang.
- [6] Tatemichi, I., Kawaguchi, M, “A New Approach to Seismic Isolation: Possible Application in Space Structures”, International Journal of Space Structures, May, Vol. 15(2), pp. 145-154, 2000.
- [7] Fan, F., Shen, S.Z, Parke, G.A.R., “Theoretical and Experimental Study of Vibration Reduction in Braced Domes using a Viscous Damper System”, International Journal of Space Structures, December, Vol. 19(4), pp. 195-202, 2004.
- [8] Suzuki, K.; Saeki, E; Watanabe, A, “Development of U-Shaped Steel Damper for Seismic Isolation System”, Nippon Steel Technical Report, No. 92 July, 2005
- [9] Kato, S., Kim, Y.B., Nakazawa, S., Ohya, T, “Simulation of the Cyclic Behavior of J-Shaped Steel Hysteresis Devices and Study on the Efficiency for Reducing Earthquake Responses of Space Structures”, Journal of Constructional Steel Research, October, Vol. 61(10), pp. 1457-1473, 2006.
- [10] Kato, S., Nakazawa, S., “Seismic Design Method of Single Layer Reticular Domes with Braces Subjected to Severe Earthquake Motions”, Sixth Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structures, Seoul, Korea, October, pp. 131-140, 2000.
- [11] Kato, S., Konishi, Y., “A Study on Behavior of A Double Layer Dome with VED Installed in the Braces of the Sub-Structures under Severe Earthquake Motions”, International Symposium on Theory, Design and Realization of Shell and Spatial Structures, Nagoya, Japan, October, pp. 264-265, 2001.
- [12] Fujita, M., Sedo, H., Iwata, M., “Flat System Truss with Axial Hysteretic Dampers as Damage-Controlled Structure”, Journal of Structural and Construction Engineering, AIJ, September, Vol. 559, pp. 165-172, 2002 (in Japanese).