

MODIFIKASI SISTEM KABEL UTAMA JEMBATAN GANTUNG DENGAN KLEM UNTUK MENINGKATKAN KEKAKUAN STRUKTURAL

(MODIFICATION OF MAIN CABLE SYSTEM OF SUSPENSION BRIDGES BY CLAMP TO INCREASE STRUCTURAL STIFFNESS)

Lanneke Tristanto¹⁾, Gatot Sukmara²⁾

Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan
Jl. A.H. Nasution 264, Bandung 40294
e-mail: ¹⁾lanneketristanto@gmail.com, ²⁾gatot.sukmara@pusjatan.pu.go.id
Diterima: 27 Mei 2016; direvisi: 30 Mei 2016; disetujui: 22 Juni 2016

ABSTRAK

Jembatan gantung terdiri atas elemen utama mendasar: kabel utama, gelagar pengaku, menara dan blok ankur. Sistem kabel utama memikul beban terbagi rata simetris melalui bentuk parabolik klasik sehingga tidak terjadi defleksi, sedangkan fleksibilitas lentur akibat beban hidup asimetris dipikulkan pada gelagar pengaku. Makalah ini menjelaskan cara modifikasi sistem kabel utama untuk mengurangi fleksibilitas lentur dan defleksi akibat beban hidup asimetris dan meningkatkan kekakuan struktural. Cara pertama adalah sistem klem kabel utama tunggal di tengah bentang yang mengikat kabel utama pada gelagar pengaku, yang me-reduksi defleksi maksimum sekitar 30% pada dimensi kabel utama dan gelagar pengaku yang dipertahankan sama. Sistem klem kabel utama tunggal lazim digunakan pada jembatan gantung bentang sangat panjang. Cara ke dua adalah sistem klem kabel utama ganda yang meningkatkan kekuatan kabel dan dengan demikian mereduksi defleksi maksimum sekitar 60%. Sistem klem kabel ganda telah digunakan pada jembatan bentang panjang seperti jembatan Barito di Kalimantan. Dengan menggunakan prinsip statika sederhana yang mengawali inovasi klem, akan ditunjukkan bagaimana peningkatan kekakuan struktural terwujud, dengan syarat klem bekerja efektif.

Kata kunci: jembatan gantung, sistem klem kabel utama tunggal, sistem klem kabel utama ganda, defleksi, kekakuan struktural

ABSTRACT

A suspension bridge comprises of principal main elements, i.e. main cable, stiffening girder, tower and anchorage block. The main cable system carries symmetrical uniform distributed load through the classical parabolic shape resulting zero deflection, while the stiffening deck girder carries the bending flexibility caused by unsymmetrical live load. This paper describes the modification methods for the main cable system in order to reduce bending flexibility and deflection caused by anti symmetrical live load and thereby increasing structural stiffness. The first method is clamped single main cable system that ties the main cable to the stiffening girder at center span, reducing maximum deflection around 30% while enhancing main cable and stiffening girder dimensions. This clamped single main cable system is generally used in super long span suspension bridging. The second method is the clamped twin main cable system that increases cable strength and thereby reducing bending flexibility and deflection around 60%. The clamped twin cable system is used in long span suspension bridging, like the Barito bridge Kalimantan. Using simple principles of statics that initiated the clamp innovation, it is shown how structural stiffness increase is obtained, providing the clamp is working effectively.

Keywords: suspension bridge, clamped main cable system, clamped twin cable system, deflection, structural stiffness

PENDAHULUAN

Jembatan gantung memikul beban terbagi rata simetris seperti berat sendiri lewat bentuk parabolik kabel utama tanpa menimbulkan defleksi, tetapi bersifat fleksibel terhadap beban antisimetris akibat beban hidup (bh). Defleksi maksimum terjadi bila beban hidup antisimetris berada pada setengah bentang utama, karena kabel utama mengalami defleksi arah memanjang di tengah bentang yang meningkatkan defleksi vertikal pada kedua bagian setengah bentang utama lantai yang dikenal sebagai defleksi *seesaw* yaitu ke bawah dalam setengah bentang dengan beban lalu lintas dan ke atas dalam setengah bentang tanpa beban lalu lintas.

Karakteristik deformasi dapat diperbaiki bila kabel utama tertahan oleh gelagar pengaku/lantai terhadap perpindahan memanjang di tengah bentang. Sistem jembatan gantung dengan klem tengah bentang akan mengikat kabel utama ke lantai di tengah bentang. Bentang gelagar pengaku dapat dianggap setengah bentang utama ($\frac{1}{2}\ell$) dalam perhitungan reduksi defleksi *seesaw* yaitu ke bawah dalam seperempat bentang dengan beban lalu lintas dan keatas dalam seperempat bentang tanpa beban lalu lintas Dalam hal ini lantai menerus didukung oleh perletakan tetap pada sisi menara/blok angkur kiri dan oleh perletakan bergerak dalam arah memanjang pada sisi menara/blok angkur kanan.

Cara modifikasi dengan kabel ganda (*twin cable*) lebih bermanfaat dalam meningkatkan kekakuan terhadap beban hidup asimetris. Bentang utama terbagi dalam bagian-bagian akibat peningkatan jumlah kabel sehingga diperoleh kombinasi antara kabel gantung murni dan kabel beruji murni yang diklem bersama di tengah bentang. Hasilnya merupakan peningkatan gaya horizontal dan kekakuan kabel.

Walaupun kabel ganda memerlukan lebih banyak bahan kabel dibanding kabel parabolik klasik, tetapi kinerja terhadap beban hidup sangat baik, dan keperluan dimensi gelagar pengaku menurun sehingga beban mati (bm) berkurang. Bila beban hidup ditempatkan pada setengah bentang utama, maka profil funikuler langsung menerima beban tambahan dan defleksi *seesaw* lebih kecil (Irvine 1989).

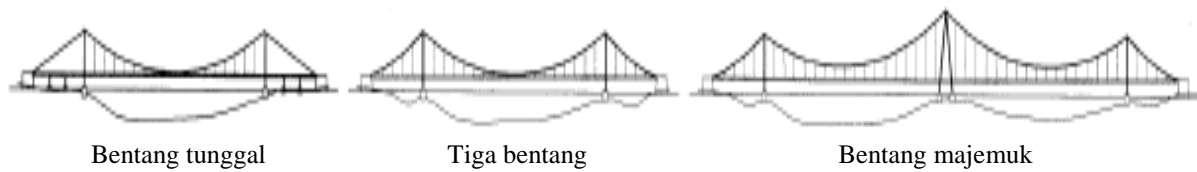
Manfaat peningkatan kekakuan struktural dengan modifikasi sistem kabel ganda telah diterapkan pada jembatan Barito di Kalimantan Selatan yang merupakan rangkaian dua jembatan gantung dengan panjang total 1.080 m.

Sistem klem pada asal mulanya ditemukan berdasarkan perhitungan statika sederhana dan digunakan sebagai perlengkapan untuk memperkaku jembatan gantung pejalan kaki (Irvine 1988). Perkembangan teknologi sedemikian pesat dan sekarang sistem klem lazim digunakan pada jembatan gantung bentang panjang (Gimsing and Georgakis 2012).

KAJIAN PUSTAKA

Klasifikasi

Klasifikasi jembatan gantung dilakukan sesuai jumlah bentang apakah bentang tunggal, tiga bentang dengan dua menara, bentang majemuk dengan tiga atau lebih banyak menara sesuai Gambar 1. Jembatan gantung dengan tiga bentang adalah yang paling umum digunakan. Pada jembatan gantung bentang majemuk, perpindahan horizontal dari puncak menara dapat meningkat akibat kondisi pembebanan sehingga perpindahan tersebut perlu dikendalikan.

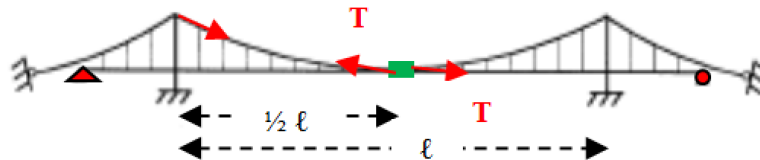


Gambar 1. Klasifikasi sesuai jumlah bentang

Prinsip sistem klem kabel utama tunggal

Dalam hal ini rantai menerus didukung oleh perletakan tetap pada sisi menara/blok angkur kiri dan oleh perletakan bergerak dalam arah memanjang pada sisi menara/blok angkur kanan. Karena klem di tengah mengikat kabel utama ke rantai, terjadi gaya aksial T dalam bagian rantai kiri dan bagian rantai ini harus dianggap sebagai bagian sistem kabel sesuai Gambar 2. Efisiensi meningkat bila klem tengah berada dalam sistem dengan puncak menara tertahan terhadap perpindahan memanjang. Dengan demikian klem lebih efisien pada jembatan gantung dengan bentang samping

pendek. Klem tengah tertahan dalam arah memanjang pada kondisi beban hidup bervariasi, tetapi gerakan memanjang klem tengah terjadi akibat perubahan temperatur mengikat rantai memanjang dan memendek terhadap perletakan tetap. Gerakan termal proporsional dengan panjang muai sehingga reduksi gerakan diperoleh bila perletakan tetap berada pada salah satu sisi menara. Kelayakan solusi ini tergantung pada intensitas gaya horizontal yang disalurkan oleh rantai, mengikat akan terjadi lentur dalam kaki menara dan bangunan bawah/pilar yang mendukungnya (Gimsing, and Georgakis 2012).



Gambar 2. Sistem klem kabel utama tunggal, perletakan tetap : kiri, perletakan bergerak : kanan

Prinsip sistem klem kabel utama ganda

Cara modifikasi dengan penambahan kabel, membuat kombinasi antara kabel gantung murni dan kabel beruji murni. Hasilnya menunjukkan adanya peningkatan gaya horizontal (H) dan kekakuan kabel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.

Dengan demikian diperoleh jembatan yang ringan dan kaku dengan karakteristik dinamik yang baik. Bila beban hidup ditempatkan pada setengah bentang utama, maka profil funikuler langsung menerima beban tambahan tanpa terjadi defleksi besar (Irvine 1989).



Gambar 3. Sistem klem kabel utama ganda

Penerapan Sistem klem kabel utama tunggal

Dengan perkembangan teknologi, sistem klem telah disempurnakan dan digunakan pada jembatan gantung super panjang dengan bentang utama yang mencapai 1.000 m (Gambar 4(a)). Sistem ini memberikan dua keuntungan yaitu peningkatan kekakuan dan dapat mempertahankan desain orisinal untuk kabel dan gelagar pengaku. Perlu diingat bahwa dimensi kabel utama dengan penampang besar seperti pada Gambar 4(b) tidak mudah dan tidak layak untuk digabung dalam suatu sistem kabel ganda. Sistem klem di tengah bentang utama sangat berperan dan memerlukan pendetailan struktural yang cermat untuk mengikat dan mempersatukan kabel utama pada gelagar pengaku dengan modifikasi setempat (Gambar 4(a) dan Gambar 5) agar terjadi pelimpahan gaya dari

kabel utama ke gelagar pengaku yang mewujudkan efek ‘kabel beruji’ dalam mereduksi bentang lentur dan defleksi maksimum sehingga diperoleh peningkatan kekakuan struktural. Konsekuensi pelimpahan gaya akibat interaksi gelagar pengaku dan kabel utama harus diakomodasi melalui perletakan gelagar pengaku (perletakan bergerak dan tetap) dan melalui puncak menara ke kerangka atau fondasi menara. Sistem klem ini telah diterapkan pada Jembatan Lillebaelt di Denmark dengan bentang utama 700 m, Bisan Seto di Jepang dengan bentang utama 990 m, 25th April di Portugal dengan bentang total 2.277 m, dan Storebaelt di Denmark dengan bentang utama 1624 m (Chen and Lian 2013; Khaled 2006).

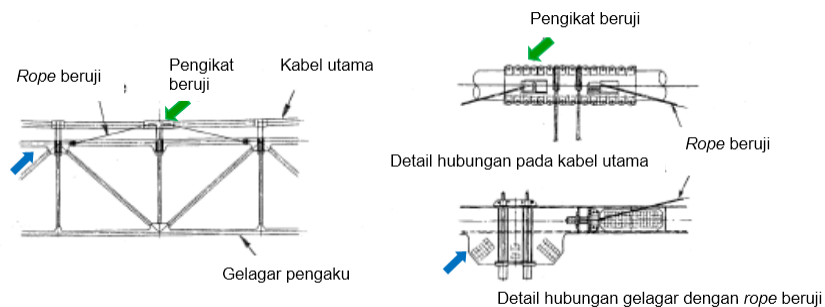


(a)



(b)

Gambar 4. (a) Sistem klem kabel utama tunggal dengan bentang utama 1.145 m pada *Halogaland Suspension Bridge* di Norwegia (Jensen 2013), (b) Penampang kabel utama *Kammon Bridge* dengan bentang total 1.082 m (Mitsui 1978)



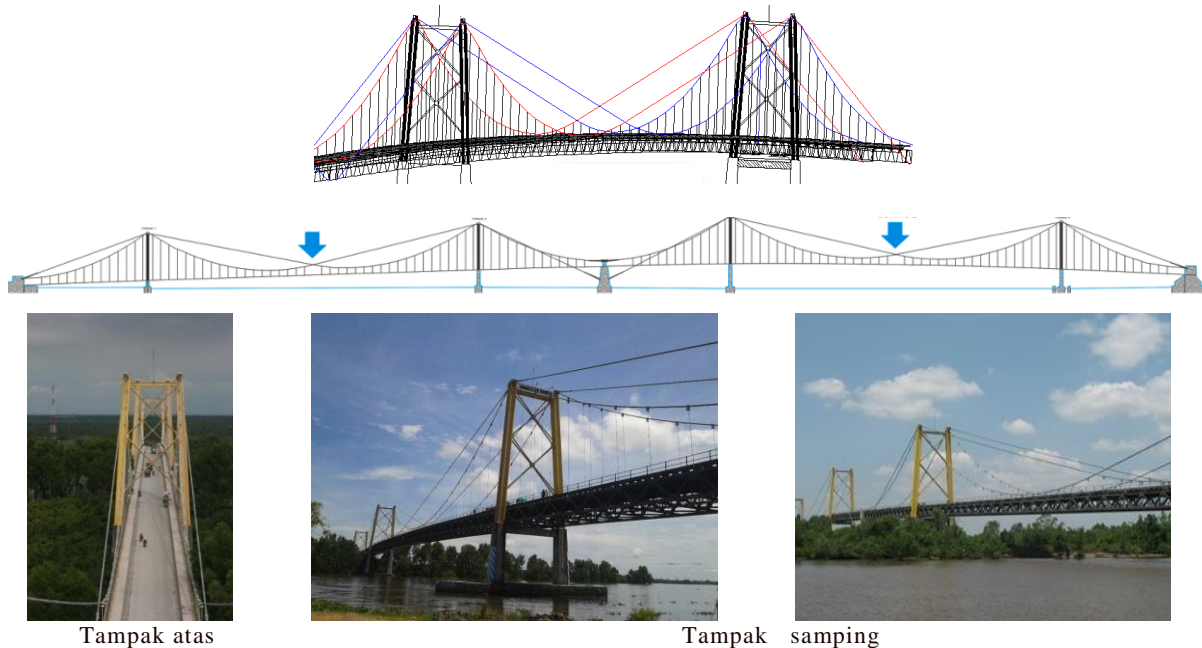
Gambar 5. Klem arah memanjang antara gelagar pengaku dan kabel utama dengan beruji (Okukawa, Suzuki and L. Harazaki 2000)

Penerapan sistem klem kabel utama majemuk

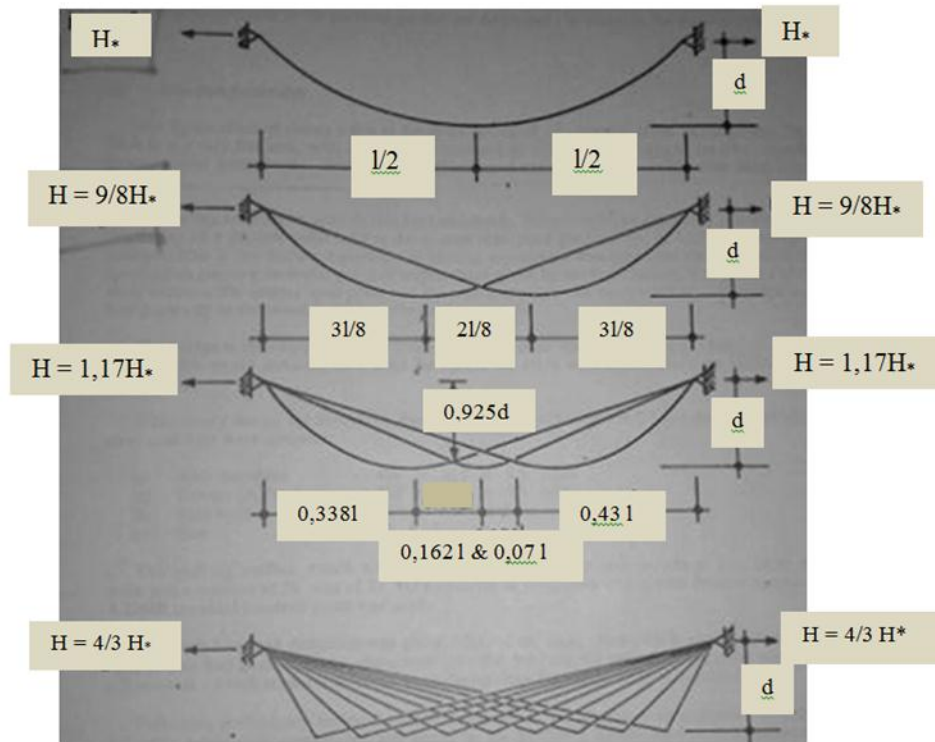
Kasus pertama dengan $H^*=(1/8).wl^2/d$ adalah jembatan gantung konvensional. Kasus kedua adalah kabel utama ganda dengan $H=9H^*/8$ yang pernah diterapkan di Kalimantan (Jembatan Barito, Gambar 6). Kasus ketiga dengan $H=1,17H^*$ pernah diterapkan di Australia. Kasus keempat dengan $H=4H^*/3$ merupakan *double fan cable-stayed bridge* (paten *Bollman truss* 1855 Gambar 7). Sistem kabel ganda majemuk layak untuk bentang panjang dengan bentang utama 350 m, yang memiliki penampang kabel tidak terlalu besar.

Detail klem

Detail klem merupakan hubungan terikat (*tied connection*) agar klem dapat berfungsi efektif dalam modifikasi sistem kabel. Program perangkat lunak memiliki fasilitas *tie* untuk simulasi klem yang tidak merupakan titik simpul (*nodal point*) biasa dalam model elemen hingga. Efektivitas klem pada Gambar 4(a) mencapai sekitar 80% (Gimsing and Georgakis 2012). Sehingga desain teoritis perlu penyesuaian ke keadaan aktual.



Gambar 6. Sistem *twin cable* Jembatan Barito (Kalimantan Selatan), bentang total 1.080m (Indonesia 2013)



Gambar 7. Modifikasi profil kabel utama yang bertambah kaku (Irvine 1989)

Teori elastis vs teori defleksi

Perbedaan antara kedua teori tersebut adalah bila lendutan kabel utama akibat beban hidup dipertimbangkan (O'Connor 1970). Dalam Gambar 8 ditunjukkan gaya dan lendutan akibat beban pada jembatan gantung. Beban hidup "p" dipikul bersama oleh kabel utama dan gelagar pengaku. Momen lentur gelagar pengaku $M(x)$ akibat pembebanan beban hidup berkurang oleh pengaruh gaya horizontal kabel H_p dalam persamaan (1), sedangkan beban mati terbagi rata (w) dipikul kabel utama. $M(x)$ berkurang oleh pengaruh H_p dan H_w akibat defleksi $\eta(x)$ dalam persamaan (2) (Okukawa, Suzuki, and L. Harazaki 2000).

Teori elastis:

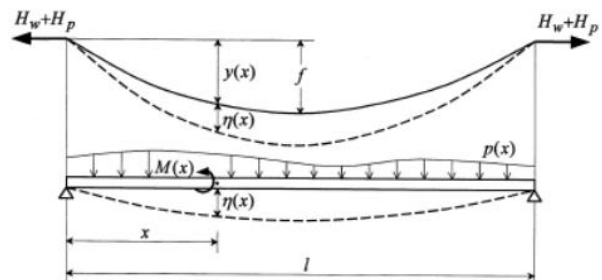
$$M(x) = M_o(x) - H_p y(x) \dots\dots\dots (1)$$

Teori defleksi :

$$M(x) = M_o(x) - H_p y(x) - (H_w + H_p) \eta(x) \dots (2)$$

Keterangan :

- $M_o(x)$ = Momen lentur akibat beban hidup yang bekerja pada balok sederhana dengan bentuk sama seperti gelagar pengaku
- $y(x)$ = Ledudukan kabel
- $\eta(x)$ = Lendutan kabel dan gelagar pengaku akibat beban hidup
- H_w = Tegangan tarik horizontal kabel akibat beban mati w
- H_p = Tegangan tarik horizontal kabel akibat beban hidup p



Gambar 8. Deformasi dan gaya dari jembatan gantung (Okukawa, Suzuki and L.Harazaki 2000)

HIPOTESIS

Memodifikasi sistem klem kabel utama pada jembatan gantung akan mereduksi defleksi *seesaw* serta meningkatkan kekakuan struktural jembatan gantung.

METODOLOGI

Analisis defleksi *seesaw* akibat beban asimetris yang sama dilakukan pada bentang tipikal 100 m untuk sistem kabel utama dengan atau tanpa klem. Analisis kasus jembatan gantung dengan bentang utama 100 m meliputi tiga tipe, yaitu tipe 1 berupa kabel utama tunggal tanpa klem, tipe 2 berupa kabel utama tunggal dengan klem, dan tipe 3 berupa kabel utama ganda dengan klem. Selanjutnya analisis defleksi *seesaw* maksimum dilakukan dengan analisis statika dan membandingkan persentase reduksi antara tipe 1, tipe 2, dan tipe 3.

HASIL DAN ANALISIS

Pendekatan analisis beban hidup asimetris untuk kabel konvensional

Pada jembatan gantung yang diperkaku, beban hidup simetris dipikul oleh kabel utama, sedangkan beban hidup asimetris dipikul bersama oleh kabel utama dan gelagar pengaku sesuai teori kompatibilitas defleksi yang dijelaskan dalam uraian berikut (Irvine, 1989). Beban hidup asimetris p pada bentang $\frac{1}{2}l$ kiri diperhitungkan sebagai beban simetris $\frac{1}{2}p$ pada seluruh bentang l (yang dipikul kabel utama), ditambah $\frac{1}{2}p$ pada bentang $\frac{1}{2}l$ kiri dan $-\frac{1}{2}p$ pada

bentang $\frac{1}{2}l$ kanan (defleksi *seesaw*) pada Gambar 9 yang dipikul oleh gelagar pengaku sebesar $(1-\alpha)(\frac{1}{2}p)$ dan kabel utama sebesar $\alpha(\frac{1}{2}p)$.

Nilai α dapat dihitung berdasarkan kekakuan gelagar utama (EI) sebagai berikut:

Beban $\frac{1}{2}p$ simetris dan berat sendiri w dipikul kabel dengan gaya horizontal

$$H_* \sim \{(w+p/2) l^2\}/8d$$

yang merupakan pendekatan dengan

$$\Delta_1 H_* \sim M'$$

Pada seperempat bentang

$$M' = \{p/2 (l/2)^2\}/8$$

dan defleksi kabel

$$\Delta_1 = \{[p/2 (l/2)^2]/8\} H_* = (p/8)d/(w+p/2)$$

yang direduksi dengan α menjadi

$$\Delta_1 = (\alpha p/8)d/(w + \alpha p/2),$$

serta defleksi gelagar sebesar

$$\Delta_1' = (5/384)p(l/2)^4/EI = 5pl^4/(12.288 EI)$$

direduksi dengan $(1-\alpha)$ menjadi

$$\Delta_1' = 5(1-\alpha)pl^4/(12.288 EI).$$

Berdasarkan teori kompatibilitas titik pertemuan, defleksi kabel Δ_1 sama dengan defleksi gelagar Δ_1' atau dengan persamaan

$$(\alpha p/8)d/(w + \alpha p/2) = 5(1-\alpha)pl^4/(12.288 EI)$$

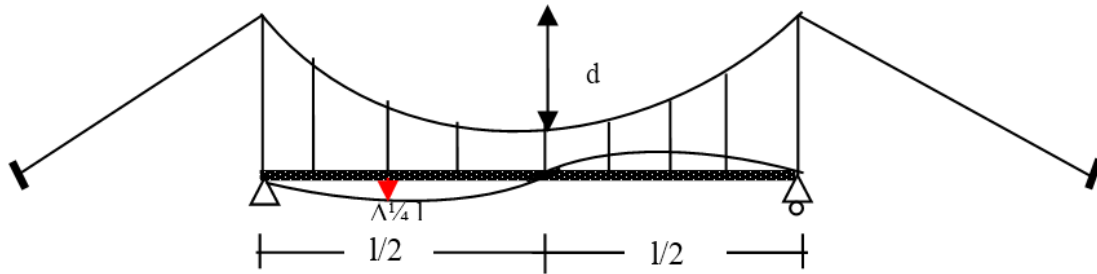
akan diperoleh nilai α . Maka momen maksimum dalam $\frac{1}{2}l$ gelagar adalah

$$= (1-\alpha)(p/2)(l/2)^2/8 = (1/64)(1-\alpha)p l^2$$

dan gaya kabel menjadi

$$H = (w + \alpha p/2) l^2/(8d)$$

Manipulasi rumus statika sederhana di atas berdasarkan teori elastik dan teori defleksi (persamaan 1 dan persamaan 2) digunakan untuk perhitungan praktis atau disebut *conceptual design* (Grigorjeva and Juozapaitis 2013).



P asimetris kebawah

$\frac{1}{2} p$ simetris kebawah

$\frac{1}{2} p$ kebawah 'seesaw'



$-\frac{1}{2} p$ keatas

Gambar 9. Beban asimetris pada jembatan gantung dengan kabel konvensional

Kabel utama tunggal konvensional

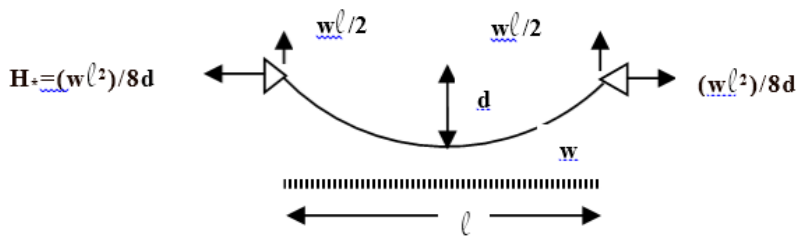
Kabel utama tunggal konvensional dengan fokus "d" pada tengah ($\frac{1}{2}l$) bentang horizontal, bila dibebani beban terbagi rata "w" akan menghasilkan momen maksimum sebesar

$$M_0 = \frac{1}{8} w l^2$$

pada anggapan balok sederhana yang dipikul oleh kabel utama dengan komponen gaya horizontal kabel

$$H_* = \frac{w l^2}{8d}$$

seperti ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Kabel utama tunggal konvensional

Modifikasi kabel utama ganda

Kabel utama ganda dengan kedalaman focus "d" pada $\frac{3l}{8}$, dengan klem tengah bentang yang membagi bentang l dalam 3 bagian ($\frac{3l}{8} + \frac{2l}{8} + \frac{3l}{8}$), pada beban terbagi rata w menghasilkan momen maksimum sebesar

$$= \frac{9}{8} w l^2 / 16$$

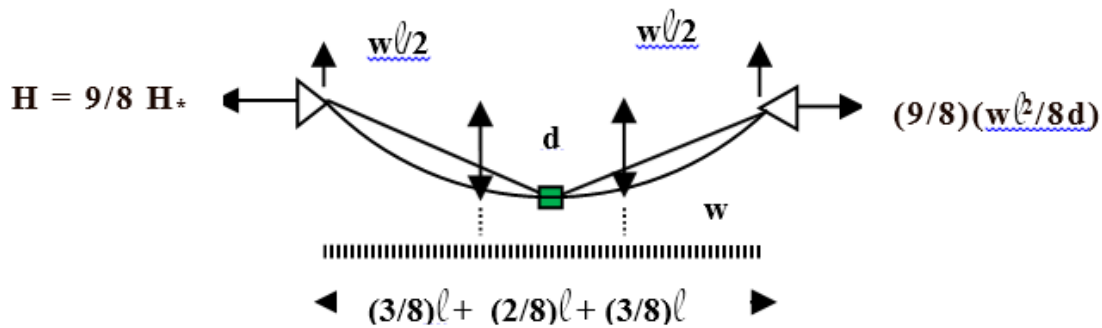
pada potongan $\frac{3l}{8}$, sehingga momen kiri dan kanan menjadi

$$= \frac{9}{8} w l^2 / 8$$

Sehingga meningkatkan gaya horizontal sebesar

$$H = \frac{9}{8} H_*$$

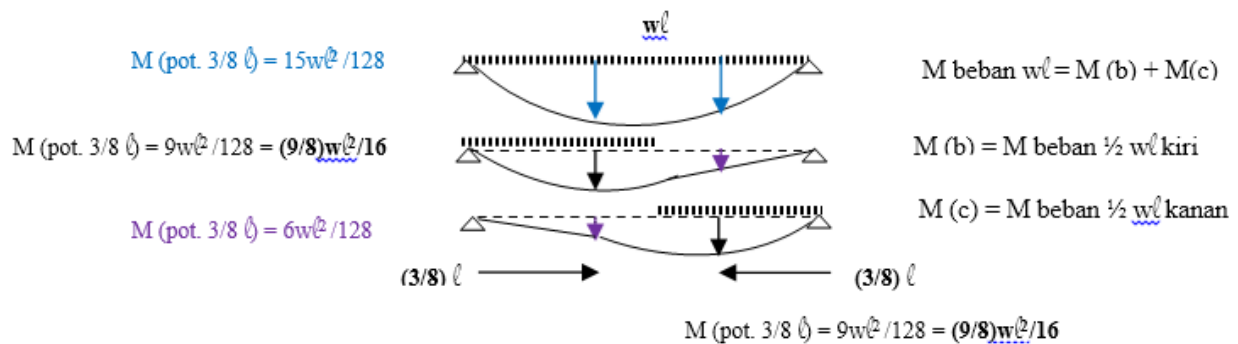
seperti ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Kabel utama ganda (diklem tengah bentang l)

Dengan rumus statika sederhana modifikasi kabel utama ganda dibuktikan sebagai berikut pada Gambar 12. Beban merata wl pada bentang l yang terbagi kiri dan kanan sebesar $\frac{1}{2}wl$ menghasilkan momen di potongan $(\frac{3l}{8})$ kiri dan kanan

sebesar $(\frac{9}{8})wl^2/16$. Serta akibat klem di tengah bentang l maka tidak ada pengaruh dari momen $6wl^2/128$ pada besaran H (ITB and UNSW 1989).



Gambar 12. Distribusi beban terbagi rata wl pada modifikasi kabel utama ganda

Defleksi maksimum kabel tunggal dengan modifikasi klem

Perkakuan dengan klem di tengah bentang menyebabkan defleksi maksimum di $1/8l$ (Gambar 13) akibat beban asimetris $\frac{1}{4}l$ pada kasus 2. Sedangkan tanpa klem terjadi defleksi maksimum di $\frac{1}{4}l$ (Gambar 9) akibat beban asimetris $\frac{1}{2}l$. Beban p asimetris pada $\frac{1}{2}l$ pada kasus 1 tidak menyebabkan defleksi pada modifikasi klem. Gaya “T” kabel dipikul oleh gelagar ke perletakan bergerak. Beban asimetris $\frac{1}{4}l$ (kasus 2) dapat dibuat superposisi $\frac{1}{2}p$ pada

$\frac{1}{2}l$ ditambah $\frac{1}{2}p$ positif pada $\frac{1}{4}l$ dan $\frac{1}{2}p$ negative pada $\frac{1}{4}l$ yang menghasilkan defleksi *seesaw* maksimum $\Delta_{1/8l}$ sebesar momen $M^2 = \frac{1}{2}p$ ($l/4$)²/8 dibagi

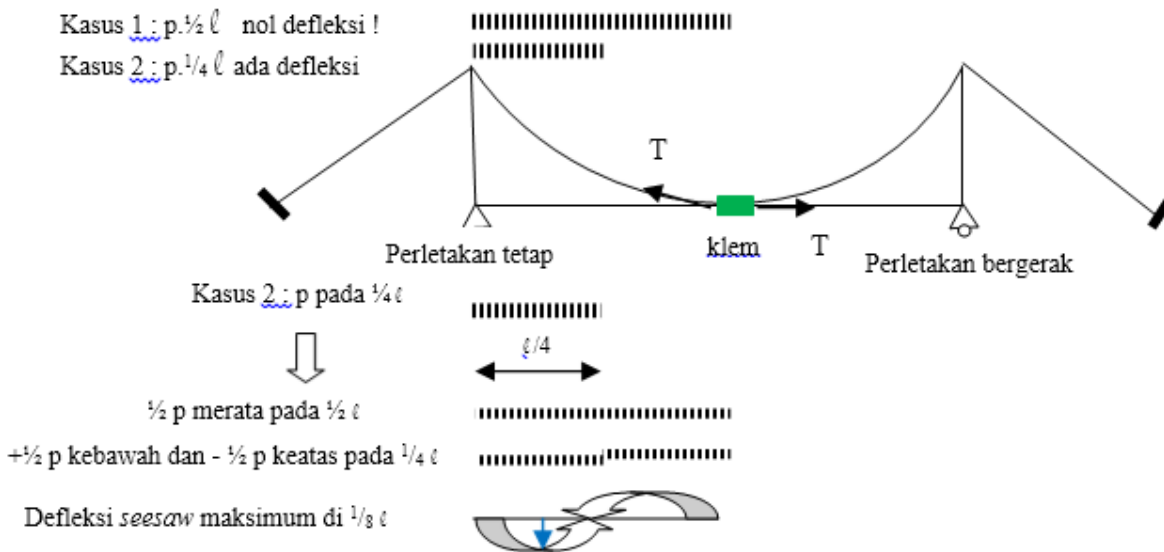
$$H_* \sim (w + \frac{1}{2}p)l^2/8d \sim (1/32) p d / (w + \frac{1}{2}p).$$

Defleksi pada sistem kabel konvensional sebesar $\Delta_{(l/4)} = (\alpha p/8)d / (w + \alpha p/2)$

terreduksi dan lebih jelas bila ditunjukkan dengan contoh numerik, mengingat nilai α untuk pembagian beban ke kabel dan gelagar digunakan pada sistem kabel tanpa

klem. Dengan “p” asimetris 3,6 kN/m pada $\frac{1}{2} \ell$, EI gelagar = 200.000 MPa x 88310 cm⁴ dan dengan $\alpha = 0,41$ untuk bentang $\ell = 100$ m dan fokus $d = 8,5$ m serta w berat sendiri merata = 2,5 kN/m diperoleh $\Delta(\ell/4) = (\alpha p/8)d/(w + \alpha p/2) = 0,48$ m (defleksi kabel konvensional tanpa klem) dibanding $\Delta(\ell/8) = (1/32) p d/(w + \frac{1}{2} p) = 0,22$ m (defleksi modifikasi kabel dengan klem), sehingga reduksi sekitar 50 %. Gelagar pengaku dengan inersia lebih besar ($I = 186.055 \text{ cm}^4 > 88.310 \text{ cm}^4$) untuk bentang yang sama, memikul beban asimetris lebih besar dengan defleksi lebih kecil menurut perhitungan manual yang diperbandingkan dengan model elemen hingga dalam program analisis struktur dengan perbedaan hasil cukup baik sekitar

10% (Indonesia 2009) seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Dalam kasus ini diperoleh persentase $\alpha = 0,24$ yang dipikul kabel sedangkan $(1-\alpha) = 0,76$ dipikul gelagar. Dengan demikian $\Delta(\ell/4) = (\alpha p/8)d/(w + \alpha p/2) = 0,312$ m dibanding $\Delta(\ell/8) = 0,22$ m, sehingga reduksi dengan klem mencapai 30%. Dengan demikian terdapat dua cara untuk mereduksi defleksi, yaitu pertama dengan memperkaku gelagar, seperti *Kammon bridge* yang selesai dibangun dalam tahun 1973 sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4(b), dan kedua dengan klem kabel utama yang diterapkan pada *Halogaland bridge* yang selesai dibangun dalam tahun 2013 sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4(a). Dalam praktek dipilih cara paling ekonomis.



Gambar 13. Defleksi maksimum pada klem kabel tunggal

Tabel 1. Perhitungan manual vs elemen hingga pada kabel konvensional

Bagian jembatan	Perhitungan manual	Program analisis struktur	Perbedaan hasil %
Kabel <i>backstay</i>	949,160 kN	860,190 kN	9,374

Kabel utama	809,206 kN	746 kN	7,811
Defleksi maksimum	0,312 m	0,314 m	0,641
Momen gelagar	427,500 kNm	376 kNm	12,050
Gaya aksial menara	820,800 kN	740,970 kN	9,630

Kabel ganda dengan modifikasi klem

Dengan asumsi bentang $l = 100$ m dengan fokus kabel ganda $d = 8,5$ m pada $3/8 l$ ($= 37,5$ m) seperti pada Gambar 11 dengan berat sendiri $w = 2,5$ kN/m dan beban hidup $p = 3,6$ kN/m (dipikul kabel ganda satu sisi), sehingga diperoleh H total dalam satu kabel sebesar $9/8H_* = (9/8)(w+p)/2.l^2/8d$

$$= \{1,25x(2,5+3,6)/2 \times 100^2\}/(8x8,5)$$

$$= 560 \text{ kN.}$$

Bila tempat penjangkaran cukup maka sebaiknya dibuat *backstay* pada sudut 12 m horizontal terhadap fokus $8,5$ m, sehingga gaya dalam *backstay* yang ekonomis $= 1,24x560 = 694$ kN. Dengan kuat tarik ijin kabel 750 MPa (untuk jembatan pejalan kaki dapat diambil faktor keamanan lebih kecil dari 3 yang umum digunakan, yaitu sebesar 2 terhadap kuat putus 150 MPa), dan faktor densitas kabel $0,67$ mengingat lilitan *strand* memiliki diameter D bersih lebih kecil dari diameter penuh, sehingga diperoleh diameter kabel $D = \sqrt{\{(694.000 \times 4) / (750 \times \pi \times 0,67)\}} = 43$ mm dengan demikian diperlukan dua kabel masing-masing berdiameter 43 mm per sisi jembatan.

Pengecekan defleksi akibat beban hidup asimetris dihitung sebagai berikut: Akibat beban hidup asimetris p pada $1/2 l$ diperoleh defleksi mendekati nol, akibat beban terpusat di tengah jembatan juga dengan defleksi nol. Kemudian terhadap beban hidup p pada $1/4 l$ ($= 25$ m) yang dipikul bersama oleh kabel $(1-\alpha)p/2$ dan gelagar

($\alpha.p/2$). Dimensi gelagar diasumsikan mempunyai $I = 2,92x 10^{-4} \text{ m}^4$ untuk gelagar I universal dengan tinggi 400 mm, lebar *flens* 155 mm, tebal badan $14,4$ mm, tebal *flens* $21,6$ mm dan berat $0,93$ kN/m. Diperoleh persamaan kompatibilitas sebagai berikut :

defleksi gelagar=defleksi kabel di potongan yang sama :

$$5\alpha.p/2.(l/4)^4/384EI \sim$$

$$\{[(1-\alpha)(p/2)(l/4)^2]/8H_{bh}\}, \text{ dan}$$

$$H_{bh} = H_{bm} (1 + (1-\alpha)p/2w) (5\alpha \times 1,8 \times 25^4)/(384 \times 200 \times 10^6 \times 2,92.10^{-4})$$

$$= \{(1-\alpha)1,8(25)^2\}/8(2,5/6,1)560 [(1 + (1-\alpha)(3,6/5))$$

$$\alpha^2 - 7,82 \alpha + 5,43 = 0$$

memberikan $\alpha = 0,775$ untuk gelagar.

Sehingga

$$H_{bh} = H_{bm} (1 + (1-\alpha)p/2w)$$

$$= (2,5/6,1)560[(1+(1-\alpha)(3,6/5))$$

$$= 266,7 \text{ kN}$$

$$\text{Defleksi kabel akibat beban hidup} = \{[(1-\alpha)(p/2)(l/4)^2]/8H_{bh}\} = 0,12 \text{ m}$$

dengan performa jembatan sangat baik terhadap beban hidup asimetris $1/4 l$. Untuk contoh tipikal $\Delta = 0,12$ m vs $0,312$ m (kabel tunggal konvensional) memberikan reduksi sekitar 60%

Ketahanan aerodinamik pada tipe klem kabel ganda

Hasil pemeriksaan kondisi Jembatan Barito (Indonesia 2013) menunjukkan kinerja aerodinamik yang memadai persyaratan dengan penjelasan hasil uji getar lapangan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengukuran respon struktur uji dinamis : nilai frekuensi stuktur (Indonesia 2013)

Bentang	Data	Frekuensi (Hz)					
		Peak 1	Peak 2	Peak 3	Peak 4	Peak 5	Peak 6
B2	I	-	-	-	1.95	2.56	-

(Suspension 1)	II	-	1.46	-	1.95	-	2.69
	III	1.34	-	-	-	2.56	-
B5 (Suspension 2)	I	1.34	-	1.89	-	-	2.75
	II	-	1.40	-	1.95	-	-
	III	1.34	-	1.89	-	2.62	-

Rasio frekuensi mendukung ketahanan terhadap angin flutter dengan nilai frekuensi torsi terhadap frekuensi lentur sebesar $f_t/f_l = 1,89/1,34 = 1,4 > 1$, sehingga memenuhi persyaratan ketahanan aerodinamik (Indonesia 2011).

Pada jembatan gantung nilai rasio f_t/f_l berkisar antara: 1 sampai 2, dengan nilai yang lazim sebesar 1,7 (Gimsing and Christos 2012), dengan rasio semakin besar maka ketahanan aerodinamik semakin baik.




PEMBAHASAN

Kabel konvensional vs modifikasi klem

Perbandingan defleksi antara kabel tunggal konvensional terhadap modifikasi

klem kabel tunggal dan kabel ganda disajikan dalam bentuk matriks seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Untuk bentang jembatan $l = 100$ m diperoleh reduksi defleksi paling besar untuk tipe klem kabel ganda walaupun volume kabel bertambah, tetapi meningkatnya gaya kabel H mengurangi keperluan dimensi gelagar. Untuk mengetahui efisiensi kegunaan klem diperlukan cara perhitungan manual untuk berbagai tipe kabel pada struktur jembatan yang sama sebagai dasar perbandingan.

Tabel 3. Defleksi kabel tunggal konvensional vs klem kabel tunggal vs klem kabel ganda

Tipe kabel utama	Beban asimetris $p \cdot (1/2l)$	Beban asimetris $p \cdot (1/4l)$
Konvensional 	Dipikul kabel $\alpha(1/2p)$ & Gelagar $(1-\alpha)(1/2p)$ Dengan defleksi maksimum $\Delta_{1/4l}$ sebesar $(\alpha p/8)d/(w + \alpha p/2)$ utk kabel yang sama dengan $5(1-\alpha)p l^4/(12.288 EI)$ utk gelagar	↓
Klem kabel tunggal 	↓ Dengan defleksi nol	Dengan defleksi maksimum $\Delta_{(l/8)}$ sebesar $(1/32) p d/(w + 1/2 p)$ sekitar 30% $\{(\alpha p/8)d/(w + \alpha p/2)\}$ Dengan α tergantung kekakuan gelagar : $(\Delta_{(l/8)}$ dengan klem) sekitar 30% $(\Delta_{1/4l}$ tanpa klem)
Klem kabel ganda 	↓ Dengan defleksi nol	Dipikul gelagar $\alpha(1/2p)$ & kabel $(1-\alpha)(1/2p)$ dengan α tergantung kekakuan gelagar : Defleksi maksimum $\Delta_{(l/8)}$ sebesar : $= \{(1-\alpha)(p/2)(l/4)^2\}/8H_{bh}$ dan $H_{bh} = H_{bm} (1 + (1-\alpha)p/2w)$ untuk contoh tipikal $\Delta = 0,12$ m vs 0,312 m (kabel tunggal konvensional), reduksi

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Reduksi defleksi yang diperoleh dengan memodifikasi kabel utama berlaku untuk tipe jembatan gantung yang diperkaku oleh gelagar. Terdapat dua cara untuk mereduksi defleksi yaitu dengan perkakuan gelagar (momen inersia gelagar diperbesar) atau dengan memodifikasi kabel utama dengan klem.

Memodifikasi kabel utama dengan klem ampuh terhadap beban asimetris setengah bentang jembatan dengan defleksi nol. Defleksi maksimum terjadi akibat beban asimetris pada seperempat bentang.

Pada modifikasi kabel tunggal dengan klem diperoleh reduksi defleksi sekitar 30% dengan mempertahankan dimensi gelagar dan kabel sesuai desain orisinal, sehingga sesuai untuk bentang sangat panjang. Jembatan bentang panjang memiliki dimensi gelagar dan diameter kabel yang cukup besar, dan tidak ekonomis bila dimensinya ditingkatkan lagi. Disamping itu juga tidak layak untuk membuat klem kabel ganda pada diameter kabel besar.

Pada modifikasi kabel ganda dengan klem diperoleh reduksi defleksi paling besar sekitar 60%, sehingga sesuai untuk bentang panjang. Reduksi defleksi dengan rentang 30%-60% meningkatkan kekakuan jembatan gantung secara keseluruhan dan juga mendukung ketahanan aerodinamik.

Saran

Untuk memperoleh ketahanan aerodinamik disarankan untuk membuat sela-

sela dalam lantai jembatan darimana angin dapat menghembus. Cara “*grating*” disarankan dilakukan pada jembatan gantung bentang panjang dan sangat panjang dan lebih murah serta praktis dibanding perlengkapan *deflector* atau peredam terhadap angin.

Verifikasi dengan program analisis struktur masih diperlukan untuk sistem modifikasi kabel tunggal dengan klem dan modifikasi kabel ganda dengan klem agar model elemen hingga mewakili tingkat efektivitas klem dalam struktur aktual.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Balai Jembatan dan Bangunan Pelengkap Jalan, Puslitbang Jalan dan Jembatan, Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat atas dukungan dan fasilitas dalam penyusunan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Chen W.F. and Duan Lian. 2013. “Bridge Engineering in Denmark”. In *Handbook of International Bridge Engineering*. Edited by Niels Jorgen Gimsing. Boca Raton: CRC Press
(<http://books.google.com/books?isbn=1439810303>)
- Indonesia. Departemen Pekerjaan Umum. 2009. *Pedoman Perancangan dan Pelaksanaan Teknik Jembatan Gantung untuk Pejalan Kaki*. Jakarta: DPU.
- Gimsing Niels J. and Christos T. Georgakis 2012. *Cable-Stayed, Cable Supported Bridges*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Grigorjeva T. and A. Juozapaitis 2013, “Revised Engineering Method for analysis of behavior of Suspension Bridge with Rigid Cables and Some Aspects of Numerical Modelling”. In

- Procedia Engineering 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques*. Amsterdam:Elsevier (www.sciencedirect.com)
- Irvine, H.Max. 1988, *Cable Structures*, Bandung: ITB.
<http://twitpic.com/bl154e>.
- _____. 1989, *Notes on Structural Form in Cable-Stayed Bridges*. New South Wales: University of New South Wales.
- Indonesia. Kementerian PU, Balitbang Pusjatan, 2011, *Naskah ilmiah: Kajian Aerodinamik Jembatan*. Bandung: Pusjatan.
- _____. Kementerian PU. Balitbang. Pusjatan. 2013. *Laporan Pemeriksaan Jembatan Barito*. Bandung: Pusjatan.
- ITB and University of New South Wales. 1989. *Course on cable structures*. New South Wales : UNSW
- Jensen, Lars. 2013. *Halogaland Suspension Bridge, Norway. IABSE Denmark Mini-Seminar* . Kopenhagen: IABSE.
- Khaled, Mahmoud. 2006. "Advances in Cable -Supported Bridges". In *Selected papers 5th International Cable-Supported Bridge Operators Conference*. New York: Taylor and Francis, (<https://books.google.com/books?isbn=0415419824>)
- Mitsui. 1978. *Highway Construction Course*. Tokyo: JICA
- O'Conner Colin. 1970. *Stiffened Suspension Bridges, Design of Bridge Superstructures*. Hoboken: Wiley Interscience. <https://openlibrary.org>.
- Okukawa, A. ,Suzuki S., and L. Harazaki. 2000. "Suspension Bridges". In *Bridge Engineering Handbook*, ed. Wai-Fah Chen and Lian Duan. Boca Raton: CRC Press