

長大橋梁の経済性比較

大塚 久哲

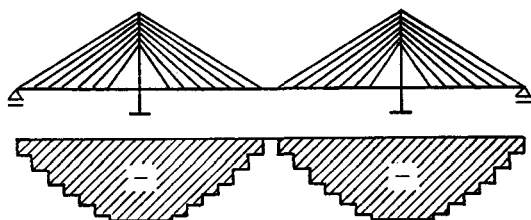
1. はじめに

本州四国連絡橋の一環として架設されている長大橋梁が、ここ数年、続々と完成しており、先頃も大鳴門橋の完成がマスコミでにぎやかに報道されていた。若戸大橋、平戸大橋、関門橋と蓄積されてきた架橋技術がみごとに開花し、いまや日本の橋梁技術は世界の最先端にあるといえる。

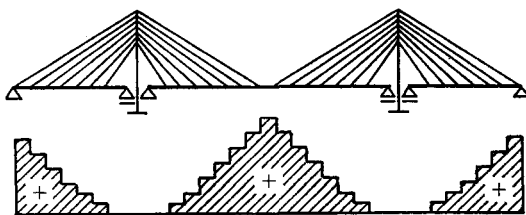
1000メートルを超す空間をひとまたぎにする長大橋の設計・架設技術は、もはや完全に完成の域に達しているといっても過言ではあるまい。そこで、今後の課題は、新しい工法、新しい構造形式の開発による廉価な長大橋梁の実現にあるといえよう。これは、開発途上国に対する技術援助を考えた場合に、特に望まれることであって、限られた援助費で最大の効果を上げるには、少しでも安い土木施設の提供が技術先進国としての責務でもある。

さて、上記の橋はすべて吊橋であり、現在のところ、長大橋梁はまさに吊橋の独壇場である。しかし、主径間長（塔から塔のあいだの水平距離）が400～600mまでは、吊橋よりも斜張橋のほうが経済的であることも、よく知られている。これを裏づけるように、先頃開通した名港西大橋をはじめ現在架設中の横浜大橋、岩黒島橋などはすべて主径間長400m台の斜張橋である。

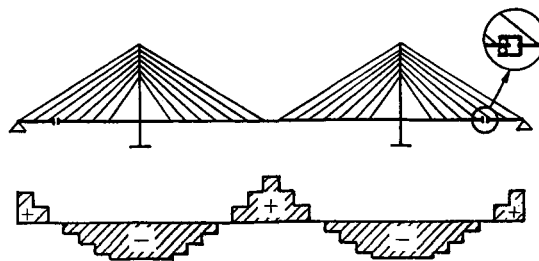
前置きが長くなったが、斜張橋において主桁の支持方式を工夫すれば、現在、吊橋の独壇場とされている主径間長においても、吊橋より廉価な斜張橋が実現可能であるということを、本稿では紹介する。



(a) 自定式



(b) 完定式



(c) 部定式

図1 主桁支持方式による斜張橋の分類

おおつか ひさのり 九州大学 工学部 土木工学教室
〒812 福岡市東区箱崎6-10-1

2. 主桁支持方式による斜張橋の分類

現在架設中の斜張橋は図1(a)のようにケーブルを主桁に定着する、いわゆる自己定着式(以下自定式と略称)である。しかしながら、長大吊橋はすべてケーブルを巨大なアンカレッジ(橋台)に定着した完全定着式(以下完定式と略称)である。

自定式吊橋の例としては、わが国ではたとえば隅田川にかかる清州橋(主径間長91.4m, 1928年完成)にその例を見るぐらいのようである。これは、自定式では巨大なアンカレッジを必要としない反面、主桁に圧縮力が作用し、構造部材としては不経済な材料の使い方となるからである。

図1(b)のように主桁を単純桁とすれば完定式斜張橋となる。このとき主桁には引張軸力が作用し、一般に許容引張応力が許容圧縮応力より大きいことを考えると、自定式に比べて経済的に有利である。ただし、軸力の大きさそのものは自定式と完定式とではほとんど変わらない。

ここで、図1(c)のように側径間に伸縮継手を挿入した構造を考えてみる。この構造では、側径間の橋台側主桁と主径間中央部の主桁とが引張軸力を受け、塔近傍の主桁が圧縮軸力を受けることになる。したがって最大軸力の大きさは、自定式・完定式と比べて半減する。これを、部分定着式(略して部定式)と呼ぶ。完定式よりさらに有利であろう。

本稿では、これらのタイプの斜張橋および吊橋のうち、最もコストが低い橋梁形式を探索していく。コストを算定する構造要素は、ケーブル(吊橋ではハンガーロープを含む。)、主桁、塔の3大構成要素である。

ここで、以後の議論を簡単にするために、主桁の断面力として軸力だけを考える。主桁は、ケーブルやハンガーロープで弾性的に支持される連続桁としての挙動も示すが、ケーブル定着点間距離が同じであれば(すなわち、吊橋のハンガー本数と斜張橋のケーブル本数とが等しければ)、曲げ

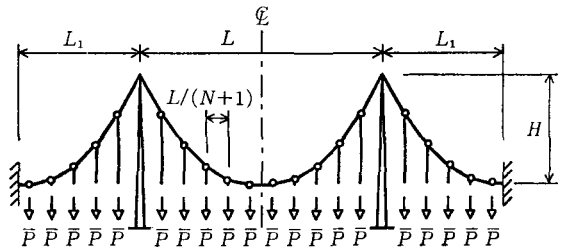


図2 吊橋の上部工(完定式)

モーメントに対する所要コストは等しいと考えてもよいからである。以下に上記の3要素のコスト算定式を述べる。

3. コスト算定式

3.1 上部工(ケーブル+主桁)

吊橋のケーブルとハンガーの必要断面積は、図2のモデルに対し、つり合い方程式から断面力を算定することにより求めることができる。自定式吊橋では、主桁にケーブルを定着するため、主桁に軸力が作用するが、その必要断面積もケーブル張力の水平成分から容易に求められる。

斜張橋のケーブル・主桁の必要断面積も同様にして、たとえばセミハープ型*では、図3のようなモデルの断面力をつり合い方程式から算出することにより求めることができる。

式の誘導過程を省略して、結果のみを示せば、吊橋および斜張橋の上部工のコストは、式(1)で算定されることになる。

$$\text{コスト 2} = \frac{\gamma PL^2}{\sigma_c} C (D_c + \frac{\sigma_c}{A_1 \sigma_s} D_s) = \frac{\gamma PL^2}{\sigma_c} CK_2 \quad (1)$$

ここに、 γ =鋼の単位体積重量、 P =主桁にかかる等分布荷重($\bar{P}N=PL$)、 L =主径間長、 σ_c =ケーブルの許容応力、 σ_s =主桁の許容応力、 C =単位重量当りのケーブルの価格、 A_1 =ケーブルと主桁の単位重量価格の比。

吊橋に対する D_c 、 D_s は ($i=c$ または $i=s$) ;

* ケーブルが平行に張られた場合をハープ型、一点より放射状に張られた場合をファン型とよぶ。セミハープ型はこれらの中間的位置にある。

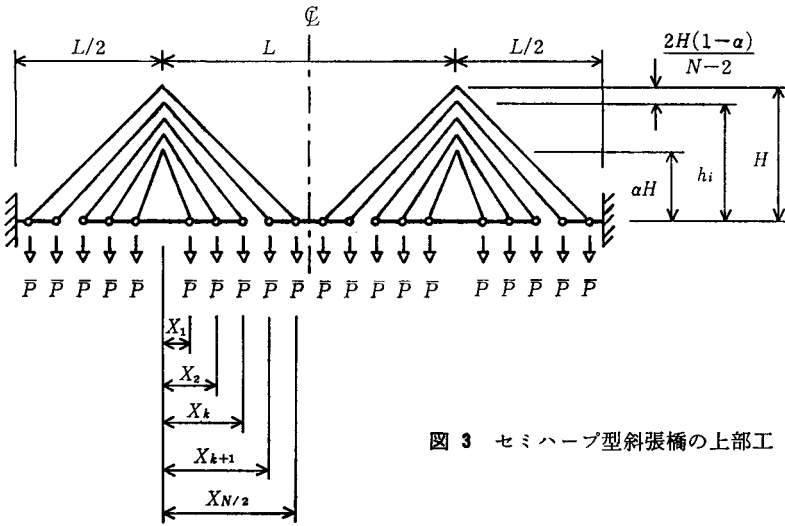


図3 セミハープ型斜張橋の上部工

$$B_c = \frac{\lambda N(N+2)}{4(N+1)^2} + \frac{(N+2)}{\lambda N}$$

$$B_s = \lambda$$

$$\sigma_s = (N+1)^2 / [k(k+1) / \sigma_{sco} + (N-2k)^2 / \sigma_{ste}]$$

セミハープ型では、

$$B_c = \frac{\gamma PL^2}{\sigma_c} \left[\frac{4}{LN} \sum_{i=1}^{i=N/2} \left\{ \frac{\alpha H}{(L/(N+1))^2 i^2} + 2H(1-\alpha)(i-1)/(N-2) + \alpha H + \frac{2H(1-\alpha)(i-1)}{(N-2)} \right\} \right]$$

$$B_s = \frac{4L}{N(N+1)^2}$$

$$D_i = B_i \left[1 - \frac{B_c \gamma L}{\sigma_c(1+2R)} - \frac{B_s \gamma L}{\sigma_s(1+2R)} \right]^{-1}$$

ここに、

$$B_c = \frac{(1+2R)}{\lambda H^2} \left[\frac{L}{4} \frac{N+2}{N+1} \sqrt{1 + \left\{ \frac{4H(N+1)}{L(N+2)} \right\}^2} + \sum_{j=1}^{j=N/2} \sqrt{\left(\frac{L}{N+1} \right)^2 + \left\{ \frac{4H(N+2-2j)}{N(N+2)} \right\}^2} + \frac{L}{8} \frac{N+2}{N+1} \sqrt{\left(\frac{L}{N+1} \right)^2 + \left(\frac{4H}{N+2} \right)^2} + \frac{H^2(N-2)}{3N} \right]$$

$$B_s = \frac{\lambda(N+2)}{8(N+1)}(1+2R)$$

N = 主径間にあるハンガーの数, R = 側径間長と主径間長の比, H = 塔高 (主桁上面から塔頂までの距離), $\lambda = L/H$ (スパンサグ比).

斜張橋に対する D_c , D_s は ($i=c$ または $i=s$) ;

$$D_i = B_i \left[1 - \frac{B_c \gamma L}{4\sigma_c} - \frac{B_s \gamma L}{2\sigma_s} \right]^{-1}$$

ファン型では、

$$B_c = \frac{\lambda(N+2)}{6(N+1)} + \frac{2}{\lambda}$$

$$B_s = \lambda$$

$$\sigma_s = 12N(N+1)^2 / [8k(k+1)(2k+1) / \sigma_{sco} + \{N(N+1)(N+2) - 4k(k+1)(3N-4k+1)\} / \sigma_{ste}]$$

ハープ型では、

$$\sigma_s = 1 / \left[\frac{1}{\sigma_{sco}} \sum_{i=1}^{i=k} \frac{i^2}{\alpha H + 2H(1-\alpha)(i-1)/(N-2)} + \frac{N+1}{\sigma_{ste}} \sum_{i=k+1}^{i=N/2} \frac{i/2 - i/(N+1)}{\alpha H + 2H(1-\alpha)(i-1)/(N-2)} \right]$$

ここに、 α = 最下段ケーブル高と塔高 (いずれも主桁面以高) の比, σ_{ste} = 鋼の許容引張応力, σ_{sco} = 鋼の許容圧縮応力, k = 伸縮継手の位置 ($k=0$ は完定式, $k=N/2$ は自定式, $0 < k < N/2$ は部定式を意味する.)

3.2 塔

塔の断面力は吊橋・ファン型斜張橋に対しては、図4のように、セミハープ型・ハープ型斜張橋では、図5のように、断面が直線変化する塔形状を仮定することによって簡単に求めることができる。前項の結果と合わせて、塔と上部工のコストの合計を示すと、式(2)のようになる。

$$\text{コスト 3} = \frac{\gamma PL^2}{\sigma_c} CK_3, K_3 = K_2 + \frac{D_t}{A_2} \quad (2)$$

ここに D_t は塔のコストに関する項で、

$$\text{吊橋に対し;} D_{ts} = \frac{2\sigma_c H_t(0.5+R)}{(\bar{\sigma}_{sco} - 0.5\gamma H_t)}$$

$$\left[\frac{1}{L} + \frac{\gamma D_s}{\sigma_s(1+2R)} + \frac{\gamma D_c}{\sigma_c(1+2R)} \right]$$

ファン型斜張橋に対し;

$$D_{tf} = \frac{2\sigma_c H_t}{(\bar{\sigma}_{sco} - 0.5\gamma H_t)} \left[\frac{1}{L} + \frac{\gamma D_c}{2\sigma_c} + \frac{\gamma D_s}{2\sigma_s} \right]$$

ハープ型・セミハープ型に対し;

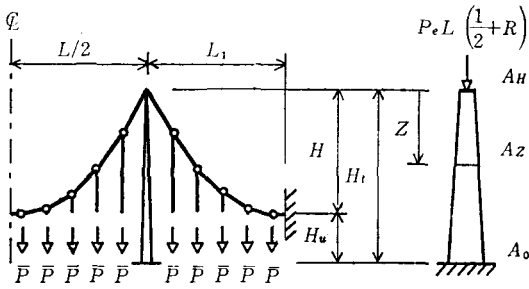


図4 吊橋の塔のモデル

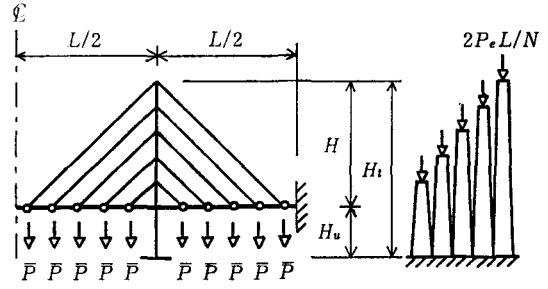


図5 ハープ型斜張橋の塔のモデル

$$D_{th} = \frac{4\sigma_c}{N} \left(\frac{1}{L} + \frac{\gamma}{2\sigma_c} D_c + \frac{\gamma}{2\sigma_s} D_s \right) \sum_{i=1}^{N/2} \frac{h_i}{\bar{\sigma}_{sco} - 0.5\gamma h_i}$$

である。ここで、 $\bar{\sigma}_{sco}$ = 塔の鋼材の許容圧縮応力 (本稿では日本道路協会の道路橋示方書により決定した。ただし断面2次半径を一定値2、有効座屈係数を0.7と仮定した。)、 H_i = 塔の全高、 H_u = 塔の主桁より下の高さ (したがって、 $H_i = H + H_u$ 。図4,5参照)、 $h_i = i$ 番目の塔の高さ、 A_2 = ケーブルと塔の単位重量価格の比

以上でコスト計算に必要な式の記述が終わったので、次節で具体的な計算結果を紹介する。

4. 計算結果と考察

以後の計算には、次の諸数値を用いた。 $\sigma_c/\sigma_{ste} = 4$ 、 $\sigma_{sco}/\sigma_{ste} = 0.8$ 、 $\gamma = 7.85$ 、 $A_1 = A_2 = 10$ 、 $R = 0.4$ 、 $H_u = 0$ 。

4.1 ハンガー(ケーブル)本数と伸縮継手位置決定のための予備計算

設計に際して、まず、吊橋のハンガー本数(斜張橋ではケーブル本数) N を決めなくてはならない。そこで、 N を4から80まで変化させて、吊橋と斜張橋のコスト3 (K_3) を比較した。その結果、32本と80本のコスト差は、すべての橋梁で1.3%以下であり、30本程度で値はほぼ収束していることがわかった。すなわち、ハンガー(ケーブル)本数 N は、このモデル化では、コストにほとんど影響を及ぼさない。

わが国および諸外国の吊橋と斜張橋計41橋について、主径間長とハンガー本数の関係をプロット

すれば図6を得る。これらのデータを基に回帰曲線を線形化手法により求めれば次式を得る(図中実線にて示す)。

$$N = 4.728L^{0.4} - 7.175$$

したがって、以後の計算では、吊橋のハンガー本数と斜張橋のケーブル本数を一致させ、回帰曲線に最も近い4の倍数を用いることにした。

また、部定式斜張橋において伸縮位置 k によるコストの変化をみたところ、 $k = N/4$ でコストが最小となることが知れたので、以後の計算における部定式斜張橋ではすべて、 $k = N/4$ とした。

4.2 各形式の経済性比較

完定式・自定式の吊橋、完定式・部定式・自定式のファン型・ハープ型・セミハープ型斜張橋、計11種類の橋梁について、主径間長を200mから2000mまで変化させたときのコスト3 (K_3) をス

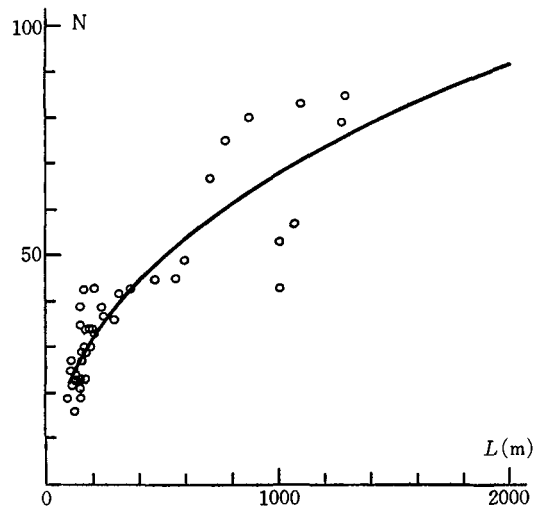


図6 主径間長とケーブル(ハンガー)本数の関係

パンサグ比 λ (=主径間長/塔高)=10 についてプロットすれば、図7を得る(セミハープ型では、 $\alpha=0.5$)。

主桁支持方式に着目してコストを比較すると、自定式、完定式、部定式の順にコストが減少していることが明らかである。斜張橋のケーブルタイプとしては、主桁支持方式にかかわらず、ファン型が最も経済的であり、次にセミハープ型、ハープ型の順である。

さて、現在最も経済的といわれている完定式吊橋と比較すれば、 $L=1400\text{m}$ 程度までは、部定式ファン型が最も経済的であり、(完定式吊橋は)それより長いスパンに対して経済的になることがわかる。

4.3 塔高と経済性

吊橋の λ (=主径間長/塔高) の実績はおよそ8から12である。 λ が小さい、すなわち塔が高いほどケーブルの静学的効率率はよいが、耐風安定性の面からケーブル張力を大きくする必要があるので、一般に上記の範囲の λ が用いられている。一方、斜張橋の λ の実績は4から6程度であり、吊橋と比較してケーブルの力学的効率率はよいといえる。

このことを考慮すると、 λ を固定して経済性を比較した図7は、斜張橋に不利な条件での比較となっていることがわかる。したがって、 λ を1から12まで変化させて、完定式吊橋と部定式斜張橋のコストを比較すると図8を得る。

$\lambda=10$ の吊橋と $\lambda=5$ の3タイプの斜張橋を比較すると、主径間長にかかわらず、斜張橋が有利であることがわかる。これは、図9を見ると一層明白である。

ケーブル本数が多いと、塔の一点ですべてのケーブルを定着することは施工上不可能であるから、セミハープ形式が実用的な形式となるが、両図から、 $\lambda=5$ 近傍では、セミハープ型はファン型とはほぼ同じであることが知れる。

以上の議論には、アンカレイジのコストを考慮

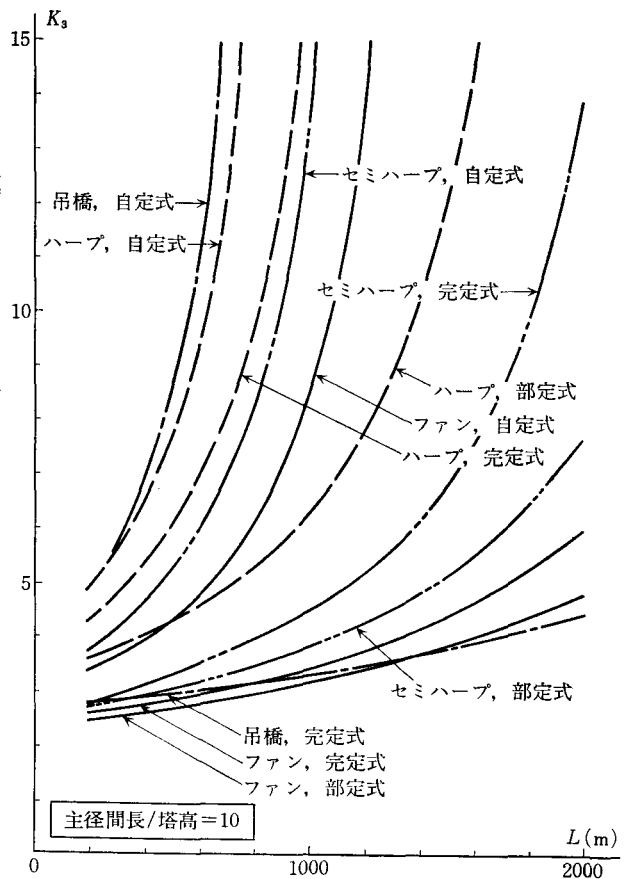


図7 各形式の経済性比較

しなかったが、単純に考えて、部定式では完定式のアンカレイジの半分程度の規模で済むはずであるので、部定式斜張橋と完定式吊橋のコストの差はさらに開くであろう。

5. おわりに

本稿では、主桁支持方式のちがいに着目して、斜張橋と吊橋との経済性を論じ、より廉価な新形式の斜張橋の可能性を示唆した。その際、上部工をトラス構造とモデル化したおかげで、簡単なコスト算定式を誘導することができ、最適化手法を用いるまでもなく、単にパラメトリック解析によってコスト最小の支持形式を見つけることができた。

コストを少しでも安くするという要求は、どの

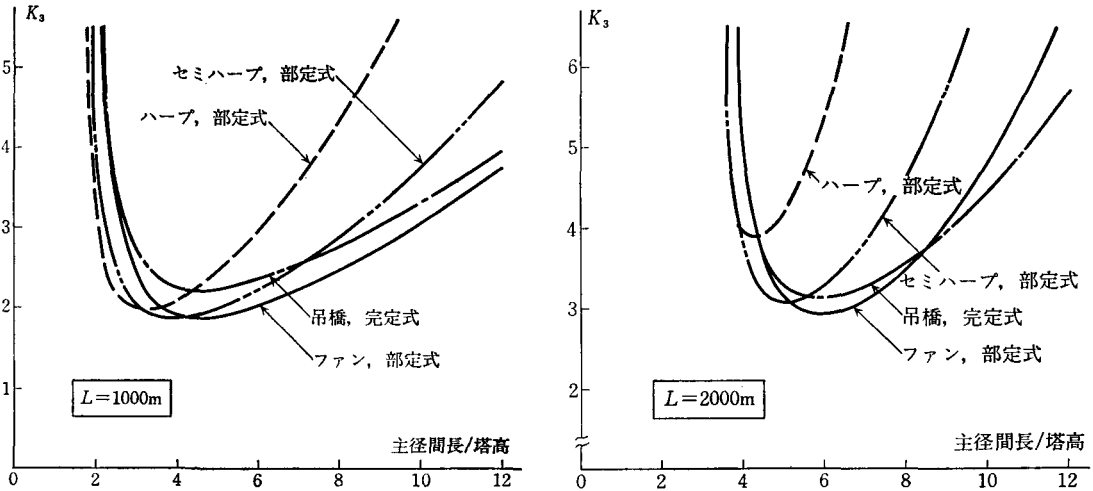


図 8 塔高によるコスト変化

分野にも共通していることであり、橋梁設計においてもそのための努力が重ねられている。また、数理計画法を用いた最適構造設計の研究も盛んに行なわれている。ただし、ここで紹介したようなアプローチの仕方であっても所期の目的は達せられるし、むしろブラックボックス的な汎用プログラムを用いることなく、最適値の探索が行なえる点で、最適化手法になじみのない読者にも参考になったかと思う。

この特集の企画者の意図も、そのあたりにあるのではなかろうかと拝察し、駄文を呈する次第である。

参 考 文 献

- 1) Gilsanz, R.E., et al. : Cable-Stayed Bridges : Degrees of Anchoring, Proc. of ASCE, *Journal of Structural Eng.*, Vol.109, No.1, pp.200 ~220, January, 1983
- 2) Gimsing, N.J. : Cable Systems for Bridges, Proc. of 11th Congress of the IABSE, Vienna, Austria, pp.727~732, 1980
- 3) Ohtsuka, H., et al. : Optimum Anchoring for Long Span Cable-Stayed Bridges, Proc. of JSCE, *Structural Eng./Earthquake Eng.*, Vol.1, No.2, pp.87~95, Oct. 1984

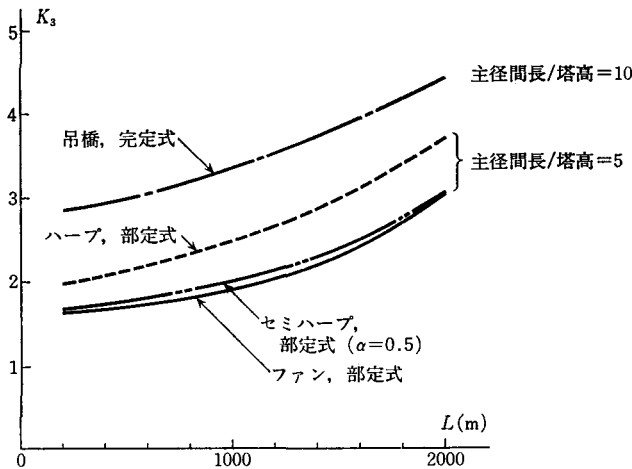


図 9 吊橋と斜張橋の経済性比較