斜張橋の最適設計に関する基礎的研究

京都大学　正員　山田 善一
日立造船　正員　○塩見 健

斜張橋は，最近になって注目されだした橋梁形式であり，その特徴は桁をケーブルによって補剛した構造である点にある。それゆえに，その設計においては，桁の断面とケーブルの断面がさまざまにとりうるので，どのように決定すればよいのかということが問題となる。この断面決定にあたり，最適設計を応用することによって，最適解がどのような傾向を有しているかをみるのが本研究の目的である。

さらに，斜張橋はケーブルにプレストレスを導入することによって，各部材の断面力を経済的に有利なように調整できるという特徴も有している。このプレストレス量をも最適設計の立場から決定して，それがどのような傾向となるかをみる。

最適設計において，構造解析の方法は斜張橋を平面骨組構造物とみなして，剛性マトリックス法が，もちいられている。最適化のための数理計画法としては Alternate Step 法[1]を用いた。設計変数としては，桁断面積 A_b，ケーブル断面積 A_c，塔断面積 A_t，ケーブルのプレストレス量 P_t が考えられている。制約条件としては，いわゆる許容応力法を用い，変位に対する制限，Buckling に対する制約については考慮されていない。目的関数には，桁および塔の製作および施工コスト $C_b = 37$ 万/t ケーブルの製作および施工コスト $C_c = 50$ 万/t を考えた。すなわち次のように定式化される。

Objective function $\quad Z = C_b \cdot l_b \cdot A_b + C_b \, l_t \cdot A_t + \sum C_c \, l_c \, A_c$

Constraint $\quad \sigma_{ca} < \dfrac{M}{W_b} + \dfrac{N}{A_b} < \sigma_{ta} \qquad$ （桁，塔）

$\dfrac{N}{A_c} < \sigma_a \qquad$ （ケーブル）

ここで，$\sigma_{ca} = -1000.0\ \mathrm{t/m^2}$，$\sigma_{ta} = 14000.0\ \mathrm{t/m^2}$，$\sigma_a = 50000.0\ \mathrm{t/m^2}$

$E_b = E_t = 21000000\ \mathrm{t/m^2} \qquad E_c = 16000000\ \mathrm{t/m^2}$

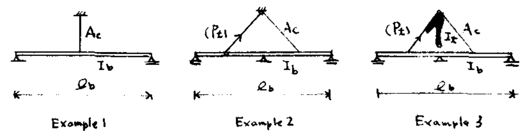
桁および塔の断面２次モーメント（I），断面係数（W）と断面積（A）については便宜的に次のような関係が成立するものとした。a，b は豊里大橋について最小二乗法によって求めた[2]。

$A = a I^{1/2}$	桁	$a = 0.59$	塔	$a = 0.64$
$W = b I^{3/4}$		$b = 0.50$		$b = 0.62$

荷重は，便宜的に 5 t/m の等分布荷重と，ケーブル取り付け点に 20t の集中荷重だけを考えている。

各部材の断面剛性だけを設計変数とした場合の計算結果は次のとおりである。（　）の中は制約条件に対する満足度をあらわし％で示してある。

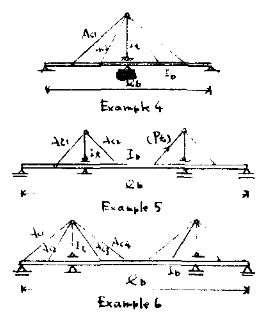
Example 1	I_b m^4	A_c m^2
ℓ_b = 30 m	0.00519 (99.83)	0.00181 (99.97)
60 m	0.03542 (99.93)	0.00355 (99.76)
90 m	0.10908 (99.84)	0.00535 (99.70)
120 m	0.24343 (99.95)	0.00715 (99.70)



Example 2	I_b m^4	A_c m^2
ℓ_b = 60 m	0.01377 (99.01)	0.01574 (12.60)
90 m	0.02683 (99.20)	0.02848 (12.02)
120 m	0.05266 (99.49)	0.03775 (11.86)
180 m	0.14731 (99.92)	0.04801 (13.53)

Example 3	I_b	I_t	A_c
ℓ_b = 60 m	0.01375 (99.69)	0.00343 (47.56)	0.02275 (9.80)
90 m	0.03358 (99.84)	0.00666 (49.73)	0.03116 (10.42)
120 m	0.06704 (99.80)	0.01026 (49.73)	0.03771 (11.22)
180 m	0.17186 (99.67)	0.01827 (58.13)	0.05622 (11.18)

Example 4	I_b m^4	I_t m^4	A_{c1}	A_{c2}
ℓ_b = 60 m	0.00588 (99.59)	0.00464 (60.07)	0.00418 (29.64)	0.01411 (13.82)
120 m	0.02804 (99.53)	0.00762 (82.81)	0.00765 (32.82)	0.02300 (13.85)
180 m	0.07975 (99.78)	0.01207 (94.86)	0.01730 (28.44)	0.03126 (16.28)
240 m	0.20668 (99.84)	0.01839 (96.84)	0.02006 (33.01)	0.02927 (26.31)



Example 5	I_b	I_t	A_{c1}	A_{c2}
ℓ_b = 140 m	0.02771 (98.45)	0.00426 (53.42)	0.03019 (10.42)	0.02852 (11.06)
280 m	0.13813 (98.31)	0.01781 (49.35)	0.04992 (11.94)	0.05603 (10.64)

Example 6	I_b	I_t	A_{c1}	A_{c2}	A_{c3}	A_{c4}
ℓ_b = 180 m	0.03577 (99.78)	0.00579 (98.02)	0.01981 (23.51)	0.02773 (13.68)	0.02845 (13.58)	0.02247 (30.45)
360 m	0.19736 (98.43)	0.02009 (96.76)	0.02445 (34.62)	0.03154 (22.31)	0.03421 (20.78)	0.02899 (29.03)

プレストレスを設計変数として計算した場合は，例2，例3，例5について計算した。

Example 2　ℓ_b = 120 m　Z = 625.84 (789.91)　I_b = 0.04527 (99.26)　A_c = 0.02370 (19.66)　P_t = 12.24 t

Example 3　ℓ_b = 120 m　Z = 699.82 (952.74)　I_b = 0.04526 (99.10)　A_c = 0.01118 (41.25)　I_t = 0.00836 (63.05)　P_t = 37.22 t

Example 5　ℓ_b = 280 m　Z = 2514.04 (3123.81)　I_b = 0.10216 (99.60)　I_t = 0.02739 (60.13)　A_{c1} = 0.02739 (22.72)

A_{c2} = 0.03389 (18.63)　P_t = 15.98 t　（目的関数値 Z の（　）内の値はプレストレスを導入しない時の Z の値）

結論

(1) 最適設計点では桁断面は fully stressed であるが，ケーブル断面は fully stressed にはならない。

(2) ケーブル本数が多くなり，スパンが長くなると塔は fully stressed に近づく。

(3) ケーブルにプレストレスを導入することによって経済的な設計とすることができる

(4) ケーブルにプレストレスを導入しても，ケーブルは fully stressed にはならない。

(5) 最適値は斜張橋の基本系となる連続桁が2径間か3径間かによって影響されず，桁に取り付けたケーブル本数と間隔によって影響される。

参考文献　1) L.A. Schmit "Structural Design by Systematic Synthesis" Proc. of The 2nd Conference on Electric Computation 1969　2) 豊里大橋設計計算書