

(22) ニールセンローゼ橋の最適構造設計 ～最小重量設計～

OTPIMUM STRUCTURAL DESIGN OF NIELSEN LOHSE GIRDER BRIDGE ～ MINIMUM WEIGHT DESIGN ～

庄司 吉弘*

Yoshihiro SHOJI

The preliminary design is very difficult for consultant engineers. The most important decisions are made in the early phase in the design process. This optimum design system (minimum weight design) was developed by simple analytical methods, which are based on design experience and repeat calculations. The results of calculation show us the behaviour of structural elements and variation of quantities, and suggest us the direction of design.

Key Words : Nielsen-Lohse girder bridge, optimum structural design, minimum weight design.

1 まえがき

設計する者は常に「設計」＝「最適設計」と考えている。部分的な最適値を決定する場合は、設計変数も比較的少なく、解析は容易である。しかし、総合的な最適値になると、概念としては理解できても、実用的にはかなりの困難が伴う。また、部分的なBESTの集合体は総合的なBESTとはなり得ない場合が多い。我々はこのことを合成誤謬とか全体誤謬というが、正しく最適設計とは総合的な最適値を決定することである。しかし、橋梁設計を一つ採り上げて、安全性、美観、経済性等の価値感の異なる要因を総合した最適値といっても容易なことではない。容易でないということは放置して良いということではない。我々は手のとどく範囲内で、可能な部分からでも攻略すべきである。最適設計の中で、かなり重要な位置を占める「最小重量設計」に着目しシステム開発を行った。しかし、あくまでも最小重量設計の結果は最終結果ではなく、設計をまとめる過程の一要因と考えるべきである。今回、予備設計の一手段として、パソコンを利用した絞り込み設計がどこまで可能であるか挑戦してみた。

2 システムの必要性

- 1) 従来から行っている形式選定の予備設計は労力を費やす割合に成果がかんばしくない。
- 2) 予備設計が曖昧な時、どのように詳細設計が優れていても全体評価は低いはずである。
- 3) 予備設計に対する社会的評価が低い。予備設計が本格化した時、真の技術競争が始まる。
- 4) 大型コンピューター時代は「計算時間」＝「計算費」という重圧があった。最適値問題はしばしば計算に長時間を要した。しかし、パソコン時代になり、計算費を気にすることがなくなった。ハード、ソフト両面から計算時間の短縮化も徐々に実現されつつある。

* 開発技建(株) 取締役道路部長 (〒951 新潟市文京町22-21)

3 システムの目標

- 1) 実用的なもので、設計に活用できなければならない。
- 2) システムは「最小重量設計」を目的とする。これは論理的に定量化が容易であり重要度が高いと判断したからである。しかし、最小重量設計は重要な要因ではあるが設計の全てではない。
- 3) 現在のところ全ての条件に対しての最適値は算出できない。限定された条件での最適値は最終的に採用されるとは限らない。このためにも、条件内の全ての結果を算出し、我々の最終判断の資料とする。

4 システムの概要

- 1) 混乱を避けるためにここで扱うニールセンローゼ橋の定義をしておく。

- a) 上下弦材共に曲げ、軸力、せん断力に抵抗する（ローゼ）。
- b) 上弦材は放物線を基本とし、下弦材は直線とする。
- c) 上下弦材は各々等桁高である。
- d) 横桁は等間隔とする。
- e) 全ての斜材はケーブルで下弦材の横桁取付位置より左右に同一傾斜角で取付けられている。
- f) 上下弦材は起拱部で剛結されている。
- g) 下弦材に直接床版を打ち下すことはしない。

- 2) ニールセンローゼ橋の重量に影響の大きい要素（設計変数）は以下の通りとする。

- a) アーチライズ (f)
- b) アーチ曲線の指数 (m)
- c) パネル数（横桁間隔数） (n)
- d) 上下弦材部材高さの和 ($H_u + H_c$)
- e) 分配率 (ψ)
- f) 上弦材部材幅 (B_u)
- g) 下弦材部材幅 (B_c)
- h) 斜材の垂線に対する角度 (θ)
- i) 使用材質
- j) 座屈長
- k) ケーブルの種類
- l) その他

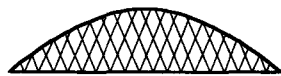


図-1 ニールセンローゼ橋の一般図

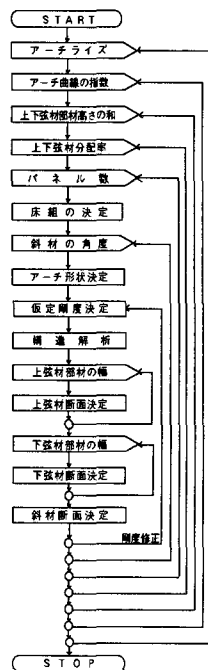


図-2 ニールセンローゼ橋のフローチャート

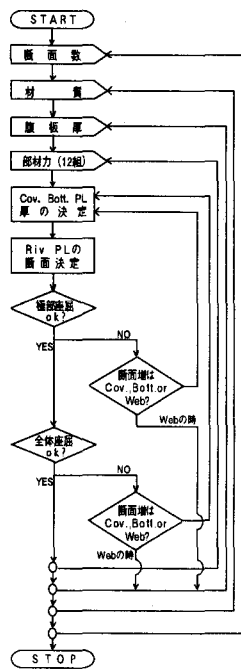


図-3 断面決定のフローチャート

上記以外にも上横構、下横構、橋門構、支承等があるが、重量的变化はあまりないと考える。また、主部材でも添接板、高力ボルト、ダイヤフラム、ケーブルアンカー等もあり変化ないものとして重量の算出は行わない。また、床組は応力度とたわみで断面を決めなければならない。床組鋼重は総鋼重の中でしめる割合も大きく、重量算出を行う。

- 3) 計算のフローチャートは図-2の通りである。設計変数は入力によって指定する。例えば「アーチライズを20m から30m まで1mごとに变化させる」というように入力させる。設計変数として扱うものは上記のa)～i)の9項目である。これらは8重のループとなっている。
- 4) 断面決定は1部材当り12組の部材力に対して図-3の断面決定のフローチャートのように行う。断面計算は材質と腹板厚が異なるごとに計算される。その内で最も軽量なものを採用する。材質が異なっても同断面の時は低材質を採用する。

- 5) 計算方法は一般の設計計算と同一である。特別な最適化手法は用いていない。出力は設計条件が変化することに行われる。
- 6) 構造解析は微小変形理論で、応力度法によった。これはパソコンを対象としたため、計算時間とメモリーの節約のためである。変形法と異なり、形状に対する自由度が少ない。

5 システムの実行結果

- 1) システムとしては、重要な設計変数を全て組み込んでいる。全ての設計変数を何段階かにして実行させると、膨大な計算時間を必要とする。そこで、「粗絞り」、「細絞り」という手法を用いる。例えばアーチライズが20m から30m まで1mごとに変化させるとする。この場合アーチライズは11回変化することになる。そこで最初は20m より30m まで5mごとに変化させる。20m, 25m, 30m の3種について最適値を決め、更にもう一度、狭い範囲のアーチライズを繰り返し計算させる。設計経験の積み重ねによって、設計変数の幅を小さくすることも可能である。また、設定設計変数の幅の中に最適値がなかった時は、再度設計変数を変更して計算を行う。
- 2) 最適値とは山の頂上のようなものであるが、頂上から多少ずれていても最適値と大差がない。崖淵のような場合もあるが、このような例はあまりないのではないかと思う。いずれにしても、最適値1つだけの出力ではなく、全ての値を出力させるので、最適値の何たるかが良く観察できる。
- 3) 重量的に最適値が決まっても、重量以外の要素も加味した場合、必ずしも軽量なものが採用されるとは限らない。ニールセンローゼ橋の場合、**a**活荷重たわみ値、**b**斜材の圧縮力、**c**架設方法、**d**工場製作、**e**風によるケーブルの振動、**f**橋の固有振動数、**g**全体座屈、**h**その他等も考慮する必要がある。本来なら、これらも考慮した最適設計を行うべきである。しかし、これらを加味して算出するロジックそのものもまだ良く解明されていない。現在のところは従来と同じ「山勘」的方法に頼らざるを得ない。

6 計算例

ここで、具体的計算を行ってみる。また、ここでの計算は最小重量設計という手段を用いているが、最小重量のみを終局的な目的としているのではなく、その途中で種々の問題を解決しながら進めていることを注意して欲しい。また、紙面の都合で最終段階までの絞り込みは行っていない。粗絞りの検討である。

〔設計条件〕

・橋の等級	TL25
・支間	180m
・幅員	車道 7.5m
	歩道 2×2.5m
・舗装	車道 8cm厚
	歩道 5cm厚
・床版	鋼床版
・雪荷重	0.1tf/m ²

〔計算条件1〕

・アーチライズ	25,30,35,40m
・アーチ曲線形状	放物線
・上下弦材部材高さの和	2.2,2.6m
・上弦材分配率	0.5
・パネル数(横桁間隔数)	16,18,20
・斜材の傾斜角度	0.3,0.45,0.6rad
・部材の幅	1.3m

表-1 ニールセンローゼ橋の斜材圧縮力と鋼重(その1)
m=2.0, $\psi=0.5$, B=1.3m

f (m)		25.0 (1/7.2)											
Hu+H.r.(m)		2.2				2.6				2.0			
床組鋼重(t)		1.6	1.8	2.0	2.2	1.6	1.8	2.0	2.2	1.6	1.8	2.0	2.2
θ (rad)		0.30	0.45	0.60	0.75	0.30	0.45	0.60	0.75	0.30	0.45	0.60	0.75
斜材番号	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
鋼重(t)		710.3	718.0	722.4	712.9	716.5	714.7	712.0	713.9	717.8	722.7	719.1	723.0
(床組+2主桁)		710.3	718.0	722.4	712.9	716.5	714.7	712.0	713.9	717.8	722.7	719.1	723.0
採否		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

- ・使用材質 SM520
- ・最小板厚（主拱） 10mm
- ・座屈長 面内 4.0m
面外 10.0m
- ・弦材断面形状 BOX
- ・斜材 ロットコイル

計算結果を表-1に示す。これより以下の事がわかる。

- ① $f=25, 30\text{m}$ では斜材に圧縮力が作用し、このままでは採用できない。 $f=35\text{m}$ の時、斜材の圧縮力は発生する場合としない場合がある。また、 $f=40\text{m}$ の時、大部分は圧縮力が発生しない。
- ② $f=35\text{m}$ より $f=40\text{m}$ の時の方が、鋼重は軽減できる。重量の軽い $f=40\text{m}$ を選ぶか、風による斜材ケーブルの振動の小さい $f=35\text{m}$ を選ぶか、別の検討が必要である。
- ③ パネル数の変化による鋼重の変化はあまりない。斜材の傾斜角 θ は0.6radより0.3radの方が微量であるが軽量となる。

次に斜材の圧縮力を除去する目的で、次の計算条件で計算を行う。

【計算条件2】

- ・下弦材1点と19点（斜材1, 2の取り付け位置と斜材37, 38の取り付け位置）にコンクリートブロックを載荷する。
- ・アーチライズ 25m
- ・上下弦材部材高さの和 2.2m
- ・パネル数 20
- ・斜材の傾斜角度 0.6rad
- ・その他は計算条件1と同一

計算結果を表-2に示す。これより判ることは、コンクリートブロックを1箇所当り約120tとする必要があり、鋼重も735.9tとなる。

次に、アーチの曲線形状を変えて、次の計算条件で計算を行う。

【計算条件3】

- ・アーチライズ 25m
- ・上下弦材部材高さの和 2.2m
- ・パネル数 20
- ・斜材の傾斜角度 0.6rad
- ・アーチ曲線形状 $y=ax^m$ の指数 m を変化させる。

表-1 ニールロセ橋の斜材圧縮力と鋼重（その2）

f (m)		30.0 (1/6)					
H_u+H_c (m)		2.2		2.6		2.0	
n		16	18	20	16	18	20
床組鋼重 (t)		187.2	189.1	187.4	187.2	189.1	187.4
θ (rad)		0.8	0.6	0.3	0.8	0.6	0.3
斜材番号	1	—	—	—	—	—	—
	2	—	—	—	—	—	—
	3	—	—	—	—	—	—
	4	—	—	—	—	—	—
	5	—	—	—	—	—	—
	6	—	—	—	—	—	—
	7	—	—	—	—	—	—
	8	—	—	—	—	—	—
	9	—	—	—	—	—	—
	10	—	—	—	—	—	—
	11	—	—	—	—	—	—
	12	—	—	—	—	—	—
	13	—	—	—	—	—	—
	14	—	—	—	—	—	—
	15	—	—	—	—	—	—
	16	—	—	—	—	—	—
	17	—	—	—	—	—	—
	18	—	—	—	—	—	—
	19	—	—	—	—	—	—
鋼重 (t)		632.8	632.8	632.8	632.8	632.8	632.8
(床組+2主拱)		632.8	632.8	632.8	632.8	632.8	632.8
採否		×	×	×	×	×	×

f (m)		35.0 (1/5.1)					
H_u+H_c (m)		2.2		2.6		2.0	
n		16	18	20	16	18	20
床組鋼重 (t)		187.2	189.1	187.4	187.2	189.1	187.4
θ (rad)		0.8	0.6	0.3	0.8	0.6	0.3
斜材番号	1	—	—	—	—	—	—
	2	—	—	—	—	—	—
	3	—	—	—	—	—	—
	4	—	—	—	—	—	—
	5	—	—	—	—	—	—
	6	—	—	—	—	—	—
	7	—	—	—	—	—	—
	8	—	—	—	—	—	—
	9	—	—	—	—	—	—
	10	—	—	—	—	—	—
	11	—	—	—	—	—	—
	12	—	—	—	—	—	—
	13	—	—	—	—	—	—
	14	—	—	—	—	—	—
	15	—	—	—	—	—	—
	16	—	—	—	—	—	—
	17	—	—	—	—	—	—
	18	—	—	—	—	—	—
	19	—	—	—	—	—	—
鋼重 (t)		632.8	632.8	632.8	632.8	632.8	632.8
(床組+2主拱)		632.8	632.8	632.8	632.8	632.8	632.8
採否		×	×	×	×	×	×

f (m)		40.0 (1/4.5)					
H_u+H_c (m)		2.2		2.6		2.0	
n		16	18	20	16	18	20
床組鋼重 (t)		187.2	189.1	187.4	187.2	189.1	187.4
θ (rad)		0.8	0.6	0.3	0.8	0.6	0.3
斜材番号	1	—	—	—	—	—	—
	2	—	—	—	—	—	—
	3	—	—	—	—	—	—
	4	—	—	—	—	—	—
	5	—	—	—	—	—	—
	6	—	—	—	—	—	—
	7	—	—	—	—	—	—
	8	—	—	—	—	—	—
	9	—	—	—	—	—	—
	10	—	—	—	—	—	—
	11	—	—	—	—	—	—
	12	—	—	—	—	—	—
	13	—	—	—	—	—	—
	14	—	—	—	—	—	—
	15	—	—	—	—	—	—
	16	—	—	—	—	—	—
	17	—	—	—	—	—	—
	18	—	—	—	—	—	—
	19	—	—	—	—	—	—
鋼重 (t)		605.9	605.9	605.9	605.9	605.9	605.9
(床組+2主拱)		605.9	605.9	605.9	605.9	605.9	605.9
採否		○	○	○	○	○	○

計算結果を表-3に示す。斜材の圧縮力を除去する目的からは効果ないことが判る。しかし、鋼重も変動

しているのが判るが、コンクリートブロックと併用してみると若干の効果があるかも知れない。

次に、斜材の傾斜角が構造系全体にどのような影響を与えるか検討してみる。

〔計算条件4〕

- ・アーチライズ 40m
- ・上下弦材部材高さの和 2.2m
- ・パネル数 16
- ・斜材の傾斜角度

0.0001,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9rad

- ・その他は計算条件1と同一

斜材の傾斜角度0.0001≒0とは普通のローゼ橋である。計算結果を表一

4、図-4、図-5、図-6に示す。これより、おおよそ以下の事が判る。

- ① 斜材の圧縮力は傾斜角=0.0001radを除いて、0.2rad以下と0.8rad以上に発生する(図-4)。すなわち、0.3～0.7radの範囲内の時に引張力のみとなるが、これはアーチライズの値によってこの幅が変化するものと考えられる。

- ② 最軽量は0.3radの時である(表-4)。

- ③ 最大活荷重たわみは斜材の傾斜角が大きくなると小さくなるが、0.6rad以上になると微増する(図-5)。また、最大活荷重たわみの発生する位置は、傾斜角が小さい時、ほぼ1/4点であるが、大きくなると1/2点になる(図-6)。これは斜材の傾斜角が小さい時はアーチ的性質で傾斜角が大きくなるとトラス的性質となることを示している。斜材の傾斜角にのみに限定していえば、ニールセンローゼ橋はローゼ的性質とトラス的性質のほぼ中間に最適値がある。

以上で $l=180m$ のニールセンローゼ橋の計算例を終わるが、今回触れなかったことで重要なことがある。ニールセンローゼ橋で重要なことは斜材に圧縮力が発生しないかということであるが、この圧縮力が発生しないようにするためにはアーチライズと斜材の傾斜角をどのように決めるかは既に述べた。更に重要な要因に「死活荷重比」がある。今回の計算は鋼床版としたが、RC床版にすると斜材の圧縮力は発生しにくくなる。比較的小橋梁にニールセンローゼ橋を適用すると斜材に圧縮力が発生し易くなるであろう。また、同一幅員であっても、車道の幅員が広い場合も斜材に圧縮力が発生し易い。これはし荷重には集中荷重があり、群集荷重は分布荷重のみである為である。

表-2 コンクリートブロック添架による
斜材の軸力と鋼重

ブロック 荷重(tf)	斜材2の 軸力(tf)	鋼重(t)
0	-6.812	713.3
30	-6.066	719.6
60	-4.447	725.5
90	-1.842	729.7
120	+1.853	735.9

表-3 f- θ 曲線指数の変化と斜材軸力

$f=25.0m, n=20, H_u=1.1m, H_f=1.1m, B=1.3m, \theta=0.6rad$

m	1.85	1.90	1.95	2.00	2.05	2.10	2.15
斜材の 最 小 軸 力 (t)	-6.985	-6.911	-6.978	-6.812	-6.678	-6.678	-6.412
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
鋼重(t)	734.9	724.3	719.0	713.3	708.1	702.8	697.8

表-4 斜材傾斜角の変化と斜材最小軸力/鋼重/活荷重たわみ

$f=40.0m, n=16, m=2.0, H_u=1.1m, H_f=1.1m, B=1.3m$

斜材傾斜角(rad)	0.0001	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
1	max 32.205	41.905	48.281	51.808	51.232	50.352	51.161	48.295	42.324	32.200
2	max 32.201	21.001	10.932	4.926	4.291	6.321	7.978	6.812	-2.579	-1.724
3	max 40.393	30.907	34.066	34.018	33.424	36.240	36.179	33.728	25.538	24.331
4	max 40.381	14.195	4.525	11.700	21.838	28.445	34.811	38.423	47.853	51.221
5	max 39.427	-4.554	5.757	12.912	25.576	31.150	31.598	31.019	25.224	21.322
6	max 39.418	-11.504	-6.479	14.044	21.092	27.180	26.587	27.334	26.990	69.093
7	max 39.257	-28.417	-9.769	12.171	17.441	25.961	35.081	34.676	30.783	25.023
8	max 39.249	-31.743	-5.537	11.290	23.321	31.076	36.417	43.379	57.217	72.750
9	max 39.256	-42.482	-11.296	11.262	20.396	26.949	34.792	42.992	40.915	31.953
10	max 39.250	-42.255	-6.778	10.378	21.451	29.600	37.067	41.857	52.546	74.790
11	max 39.299	-48.832	-11.000	9.202	22.946	28.160	34.282	42.683	45.989	40.687
12	max 39.294	-47.621	-8.160	12.511	20.133	28.867	35.926	45.230	49.162	71.611
13	max 39.342	-51.342	-11.065	10.090	21.566	30.339	35.108	40.126	51.318	48.359
14	max 39.339	-50.724	-9.461	12.627	21.515	29.576	37.090	44.678	52.301	67.687
15	max 39.335	-51.295	-9.820	11.743	21.294	29.253	38.257	43.936	50.091	58.522
鋼重	896.6	654.7	610.7	604.4	612.6	614.8	622.4	640.4	671.1	727.9
各点の 活荷重 たわみ (m)	max 0.3545	0.1370	0.0675	0.0467	0.0384	0.0366	0.0373	0.0398	0.0442	0.0606
1	min 0.3204	0.0941	0.0301	0.0111	0.0034	0.0006	0	0	-0.0030	-0.0171
2	max 0.6340	0.2268	0.1043	0.0688	0.0557	0.0537	0.0564	0.0609	0.0711	0.1031
3	min 0.5737	0.1578	0.0461	0.0151	0.0039	0.0004	0	0	-0.0069	-0.0323
4	max 0.8046	0.2615	0.1166	0.0781	0.0650	0.0633	0.0664	0.0719	0.0868	0.1277
5	min -0.732	-0.1848	-0.0494	-0.0149	-0.0034	-0.0003	0	0	-0.0107	-0.0429
6	max 0.8541	0.2604	0.1193	0.0833	0.0716	0.0706	0.0738	0.0805	0.0998	0.1419
7	min -0.7834	-0.1838	-0.0464	-0.0134	-0.0027	-0.0002	0	0	-0.0007	-0.0152
8	max 0.7875	0.2415	0.1170	0.0865	0.0765	0.0770	0.0794	0.0874	0.1109	0.1509
9	min 0.7293	-0.1644	-0.0403	-0.0113	-0.0021	-0.0001	0	0	-0.0026	-0.0538
10	max 0.6305	0.2170	0.1135	0.0874	0.0793	0.0809	0.0844	0.0925	0.1179	0.1625
11	min 0.5824	-0.1370	-0.0336	-0.0086	-0.0014	0	0	0	-0.0034	-0.0233
12	max 0.4212	0.2028	0.1117	0.0878	0.0808	0.0824	0.0870	0.0962	0.1200	0.1718
13	min 0.3637	-0.1174	-0.0289	-0.0065	-0.0008	0	0	0	-0.0032	-0.0231
14	max 0.3083	0.1981	0.1117	0.0876	0.0816	0.0831	0.0875	0.0976	0.1206	0.1750
15	min 0.2065	-0.1047	-0.0260	-0.0053	-0.0003	0	0	0	-0.0025	-0.0214

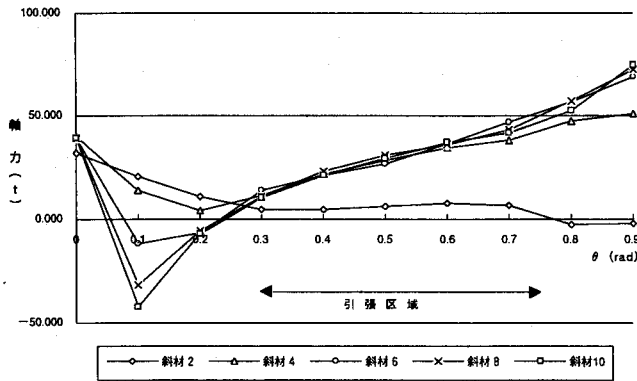


図-4 斜材の傾斜と最小軸力

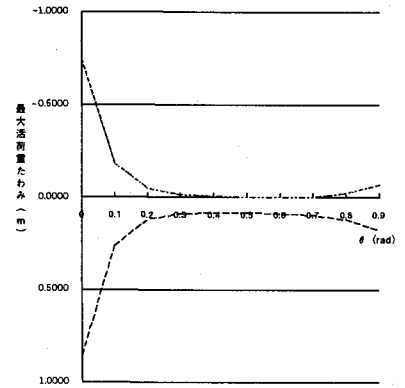


図-5 斜材の傾斜角と最大活荷重たわみ

7 まとめ

前記の計算例は今回開発したシステムでどのようなことができるか具体的な数値をもって示したもので、ニールセンローゼ橋の普遍的性質の解明を行うためのものではない。従来、設計者とは数多くの設計をこなし、経験的なものを身に付け、エキスパートへの道を進むものと考えてきた。しかし、どのような技術者でも一生のうちに、それほど多くのニールセンローゼ橋を設計するわけではなく、形状決定などの予備設計はそれほど深く研究することもできない。しかし、このように数値解析が比較的容易にできるようになると、少なくとも数値解析の範囲内では、さほどの経験がなくても解明できるようになる。

このシステムには特別なテクニックは用いていない。従来から行っている「設計手法」に「繰り返し計算」の方法を加味しただけである。設計者はこのシステムを単なる道具と解釈し、最適値への誘導は自分で行わなければならない。言い換えれば、設計者が考えたものを簡単に数値化してくれるシステムである。また、一次応力の作用する部材の計算は近似の方法を排除し、実際の設計計算書と全く同じ精度の計算を行っている。近似計算によって精度を落とした時、その誤差が全体の中に於いてどの程度影響するか判らないし、成果に対する信頼性も薄くなるからである。

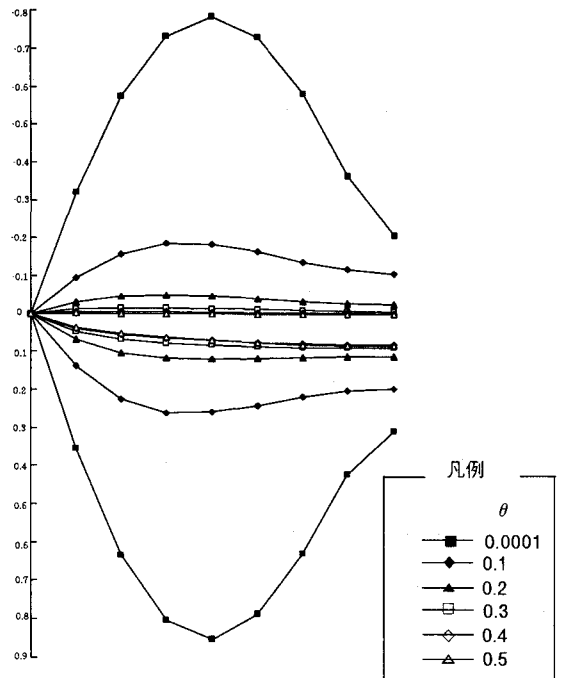


図-6 活荷重たわみ (m)