

# 新しい構造形式を有するニールセンローゼ橋の耐荷力特性に関する研究

橋梁工学分野 鳥野晃督

## 1. はじめに

ニールセンローゼ橋は、構造的に優れているだけでなく、斜材にケーブルを用いていることから軽快なイメージを与え、景観上優位であるが、構造系が複雑であることから、設計時の計算量が膨大で煩雑である。

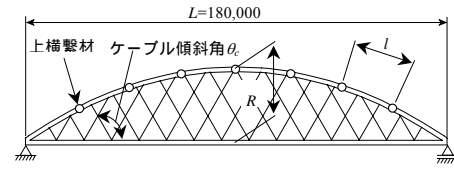
一方、文献1)では、維持管理が容易、かつデザインが斬新なケーブル系橋梁の検討を行っており、細径ケーブルを用い、その定着部を塔や主桁の断面の外側に設けたピン定着構造を有する斜張橋の提案を行っている。しかし、維持管理の容易性によるケーブル安全率の見直しを課題としており、また、提案している定着構造をニールセンローゼ橋に適用した場合の検討はまだ行われていない。

本研究では、ニールセンローゼ橋のパラメトリック解析により、構造上の差異による力学的特性、経済性(鋼重)、および耐荷力特性の違いを明確にし、より合理的で経済的なニールセンローゼ橋を設計するための基礎的資料を提供する。また、新しいケーブル定着形式を提案し、それを適用したニールセンローゼ橋の概略試設計と耐荷力解析を行い、新しいケーブル定着形式の適用性について明らかにする。

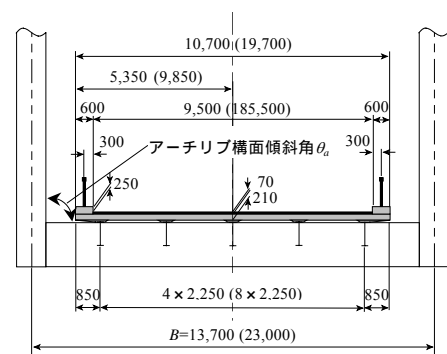
## 2. ニールセンローゼ橋の概略試設計と耐荷力特性

### 2.1 概略試設計および解析モデル

ニールセンローゼ橋の力学的特性、経済性、および耐荷力特性を調べるため、現行の道路橋示方書(以下、道示と称す)<sup>2)</sup>に従って、概略試設計を行い、それをもとに弾塑性有限変位解析を行った。基本的な構造諸元を図-1に示す。試設計時に考慮する荷重は、死荷重(D)、B活荷重(L)、および衝撃(iL)の鉛直荷重と死荷重(D)および風荷重(W)の組合せ荷重(水平横荷重)とした。また、アーチリブの有効座屈長は、考慮せずにゼロとした。有効座屈長  $l_{eff}=0$  とすることにより、設計時に部材は座屈しないとされるため、有効座屈長を考慮した場合と比べて部材の板厚が薄くなり、鋼重が軽くなると考えられるからである。変化させる構造パラメータを表-1, 2に示す。また、解析時の載荷荷重は、スパン全長に載荷する活荷重と、アーチリブ補剛桁断面、および上横繫材の死荷重を組み合わせた鉛直荷重は式(1)、風荷重と照査のための死荷重を組み合わせた水



(a) 側面図



注) ( )内は広幅員モデルの場合を示す

(b) 横断面図

図-1 概略試設計橋・解析モデルの概略図(単位:mm)

表-1 概略試設計および弾塑性有限変位解析で変化させる構造パラメータ

アーチリブ・補剛桁断面タイプ	ライズ・支間長比 R/L	アーチリブ傾斜角 $\theta_a$ (°)	上横繫材本数	
標準断面	A	1/6	90	3, 7, 11
	B	1/6, 1/4.5°, 1/7.5°	90, 80	"
	C	1/6, 1/4.5°, 1/7.5°	90, 80	"
	D	1/6	90	"
スレンダー断面	BS	"	90, 80	3, 7
	CS	"	"	"
広幅員大断面	BL	"	90, 72	"
	CL	"	"	"

注) \*は、 $\theta_a=90^\circ$ 、上横繫材7本の場合のみ実施

平横荷重は式(2)に示すように荷重パラメータ $\alpha$ を比例漸増させて載荷し、終局荷重パラメータ $\alpha_u$ を求め、 $\alpha_u$ により耐荷力を評価する。

$$\alpha_L (D+L+iL) \quad (1)$$

$$\alpha_W (D+W) \quad (2)$$

ここに、荷重パラメータを区別するため、鉛直荷重載荷時の荷重パラメータおよび終局荷重パラメータをそれぞれ $\alpha_L, \alpha_{Lu}$ とし、水平横荷重載荷時の荷重パラメータ

表-2 各モデルのアーチリブおよび補剛桁の断面形状と寸法（単位：mm）

断面タイプ名		A	B (BL)	C (CL)	D	
標準断面 ( )内は 広幅員 モデルの 値	アーチリブ					
	縦横比	2.5:1	1.5:1	1:1.5	1:2.5	
補剛桁	縦横比	2.5:1	1.5:1	1:1.5	1:2.5	
	断面タイプ名	BS	CS	BS	CS	
スリット断面	アーチリブ					
	縦横比	1.5:1	1:1.5	1.5:1	1:1.5	
上横繫材						
		a	b	c	d	e

タおよび終局荷重パラメータをそれぞれ $\alpha_w$ 、 $\alpha_{wu}$ と定義する。また、解析モデルに導入した初期不整は、初期たわみと残留応力とした。

なお、解析は、弾塑性有限変位解析プログラムEPASS<sup>3)</sup>を用いて行った。

## 2.2 概略試設計および解析結果

概略試設計結果として単位橋床面積当たりの鋼重（全鋼重 / (有効幅員 × 橋長)、以下全鋼重と称す）を表-3に示す。この表より、いずれのモデルも、アーチリブおよび補剛桁の断面形状を縦長から横長にすれば、鋼重は小さくなっていることがわかる。また、上横繫材本数の増減と鋼重には特に目立った傾向が見られなかった。これは、上横繫材本数が多いと橋梁全体の剛性が向上するため、アーチリブの鋼重は軽くなるが、本数増による上横繫材の鋼重増加が影響しているとみられる。

また、解析結果を表-4、5に示す。これらより、縦長断面より横長断面の方が終局荷重パラメータ $\alpha_{Lu}$ 、 $\alpha_{wu}$ が大きく、大きい耐荷力を有している。また、平行弦型よりバスケットハンドル型の方が $\alpha_w$ 、 $\alpha_{wu}$ が大きい。従って、鉛直荷重作用下と水平横荷重作用下の両方の載荷状態において横長断面は縦長断面に比べ、鋼重・耐荷力において有利であり、平行弦型の場合、特にそれが顕著に現れる。

## 3. 細径ケーブル多数用いたニールセンローゼ橋の耐荷力特性

### 3.1 新しいケーブル定着方法の提案

本研究では、細径ケーブルを多数適用し、アーチリ

表-3 概略試設計で得られた各試設計モデルの全鋼重

アーチリブの傾斜角		90° (平行弦型)					80° (バスケットハンドル型) (BL,CLタイプは72°)			
上横繫材本数		3本		7本		11本		3本	7本	11本
R/L		1/6.0	1/4.5	1/6.0	1/7.5	1/6.0	1/6.0			
標準幅員 モデル	標準断面	A	6.57	-	5.93	-	5.87	-	-	-
		B	5.60	5.57	5.40	5.82	5.42	4.97	4.93	4.88
		C	4.96	4.97	5.10	5.48	5.17	4.79	4.79	4.85
		D	5.02	-	5.17	-	5.27	-	-	-
	スリット断面	BS	5.47	-	5.13	-	-	4.90	4.74	-
		CS	4.92	-	4.99	-	-	4.73	4.77	-
広幅員 モデル	大断面	BL	5.44	-	5.54	-	-	5.19	5.24	-
		CL	5.21	-	5.35	-	-	5.10	5.15	-

表-4 各解析モデルの終局荷重パラメータ $\alpha_{Lu}$

アーチリブの傾斜角		90° (平行弦型)					80° (バスケットハンドル型) (BL,CLタイプは72°)			
上横繫材本数		3本		7本		11本		3本	7本	11本
R/L		1/6.0	1/4.5	1/6.0	1/7.5	1/6.0	1/6.0			
標準幅員 モデル	標準断面	A	1.21	-	1.90	-	2.03	-	-	-
		B	1.45	2.21	1.87	1.66	2.04	1.60	1.98	2.13
		C	1.78	2.39	1.99	1.78	2.17	1.75	2.06	2.20
		D	1.92	-	2.09	-	2.14	-	-	-
	スリット断面	BS	0.91	-	1.59	-	-	1.17	1.72	-
		CS	1.21	-	1.70	-	-	1.39	1.78	-
広幅員 モデル	大断面	BL	1.92	-	2.01	-	-	2.07	2.11	-
		CL	1.97	-	2.10	-	-	2.15	2.19	-

表-5 各解析モデルの終局荷重パラメータ $\alpha_{wu}$

アーチリブの傾斜角		90° (平行弦型)					80° (バスケットハンドル型) (BL,CLタイプは72°)			
上横繫材本数		3本		7本		11本		3本	7本	11本
R/L		1/6.0	1/4.5	1/6.0	1/7.5	1/6.0	1/6.0			
標準幅員 モデル	標準断面	A	1.07	-	1.39	-	1.70	-	-	-
		B	1.23	1.81	1.62	1.49	1.78	1.35	1.73	1.85
		C	1.46	1.95	1.82	1.70	1.91	1.59	1.88	2.04
		D	1.54	-	1.94	-	2.05	-	-	-
	スリット断面	BS	0.93	-	1.17	-	-	1.08	1.52	-
		CS	1.15	-	1.60	-	-	1.27	1.71	-
広幅員 モデル	大断面	BL	1.59	-	1.64	-	-	2.05	2.17	-
		CL	1.67	-	2.06	-	-	2.19	2.28	-

ブ・補剛桁の断面外にケーブル定着部を設けたニールセンローゼ橋（マルチ細径ケーブルニールセンローゼ橋, Multi Fine Cable Nielsen-Lohse Bridges, 以下, MFCニールセンローゼ橋と称する）を提案する（図-2）。提案する橋梁のケーブル定着方法の概要を図-3, 4に示す。この定着方法の特徴として、ケーブルが細いため、その分使用する本数は増えてしまうが、1本当たりに導入する張力をかなり小さくできるため、ケーブルの架設に用いる機材の小型化をはじめ、ケーブルの

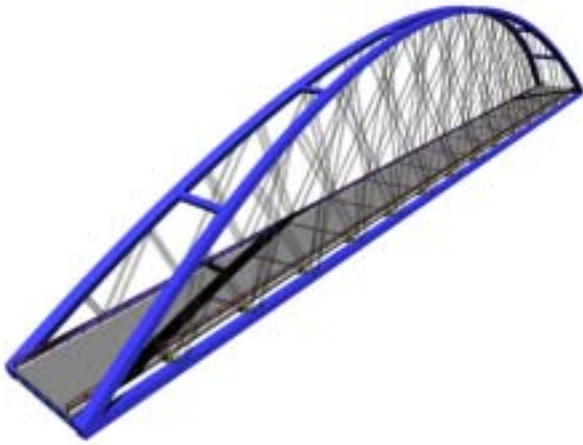


図-2 MFC ニールセンローゼ橋のイメージ図

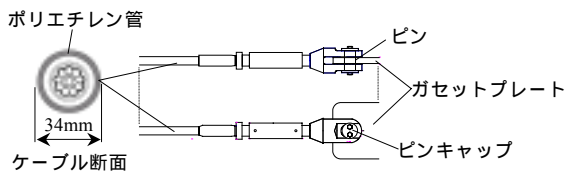


図-3 提案するケーブル定着構造

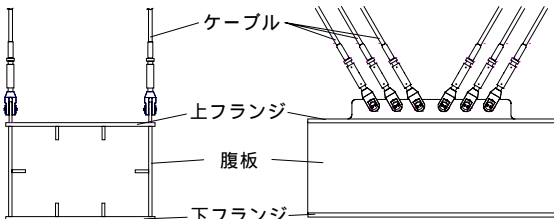


図-4 提案するケーブル配置方法

架設の簡易化が期待できる。ケーブルの並列配置を採ることにより、万一ケーブルが数本破損・破断したとしても構造系の変化が少なく、交換が容易となり、ケーブルの安全率を小さい値で設計することも可能である、などが考えられる。

### 3.2 MFC ニールセンローゼ橋の概略試設計

MFC ニールセンローゼ橋の力学的特性を調べるため、概略試設計を行った。考慮した荷重は、2.1 と同様に鉛直荷重と水平横荷重とした。概略試設計モデル

表-6 概略試設計モデルの構造諸元

項目	条件
幅員 (補剛桁間隔 $B$ )	標準幅員(2車線), (13.7m)
アーチリブ, 補剛桁の 断面タイプ	アーチリブ 補剛桁 $b=1600\text{mm}$ $b=1600\text{mm}$  縦横比 1:1.5
ライズ-支間長比 $R/L$ (ライズ $R$ )	1/6 (30m)
ケーブル傾斜角 $\theta_c$ (°)	60
概略試設計時に用いる アーチリブの有効座屈長	面内, 面外=0
上横繫材本数	7本

表-7 細径ケーブルの材料特性

断面積	ヤング率	降伏荷重 (0.2%耐力)	引張荷重
mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	kN	kN
243.7	191	387以上	451以上

表-8 概略試設計および弾塑性有限変位解析で変化させたパラメータ

項目	条件
ケーブル安全率 ( $\nu_c$ )	2.5, 3.5
アーチリブ構面傾斜角 $\theta_a$ (°)	90(平行弦, $\nu_c=3.5$ のみ), 80

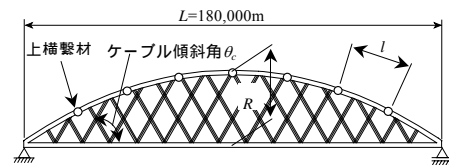


図-5 概略試設計橋の側面図 ( $\nu_c=2.5$ )

表-9 各試設計モデルのケーブル最大張力

ケーブル安全率 $\nu_c$	3.5		2.5
アーチリブ傾斜角 $\theta_a$ (°)	90	80	80
ケーブル最大張力 (kN)	123.76	123.99	172.43
実安全率	3.644	3.637	2.616
使用ケーブル本数	504	504	336

表-10 各試設計モデルの鋼重

ケーブル安全率 $\nu_c$	3.5		2.5	従来モデル (3.5)	
アーチリブ傾斜角 $\theta_a$ (°)	90	80	80	90	80
アーチリブ (kN)	3,012	2,992	3,007	3,004	2,995
補剛桁 (kN)	2,214	2,214	2,357	2,284	2,284
全鋼重 (kN/m <sup>2</sup> )	5.225	4.902	4.782	5.102	4.786

の構造諸元は表-6 に示すとおりであり、使用するケーブルの材料特性を表-7 に示す。また、変化させる構造パラメータは表-8 に示すとおりであり、アーチリブの傾斜角  $\theta_a$  とケーブルの安全率  $\nu_c$  を変化させる。従って、概略試設計橋の概略図は図-5 となる。

概略試設計結果として、表-9 に各試設計モデルの鉛直荷重作用時におけるケーブルの最大張力とそれらをケーブルの引張荷重で除した実安全率を示す。この表より、全てのモデルにおいて、実安全率が設定した安全率を満たしていることがわかる。

また、表-10 に試設計で得られた鋼重を示す。この表より、ケーブルの安全率が  $\nu_c=3.5$  と 2.5 の MFC ニールセンローゼ橋モデルを比較すると、アーチリブおよび補剛桁の鋼重に関しては、安全率が小さいモデルの方が鋼重は大きいことがわかる。ただし、横桁、ケーブルなどの重量が小さいことから、安全率を  $\nu_c=2.5$  として設計した並列配置モデルの方が全鋼重は軽いことがわかる。

### 3.3 MFC ニールセンローゼ橋の弾塑性有限変位解析

概略試設計を行ったモデルを 3 次元骨組構造物にモ

表-11 各モデルの終局荷重パラメータ  $\alpha_{Lu}$  ,  $\alpha_{Wu}$

ケーブル安全率 $v_c$	3.5			2.5		従来モデル (3.5)	
アーチリブ傾斜角 $\theta_a$ (°)	90	80	80	90	80		
鉛直荷重 ( $\alpha_{Lu}$ )	1.936	1.999	2.063	1.993	2.061		
水平横荷重 ( $\alpha_{Wu}$ )	1.759	1.829	1.930	1.817	1.884		

表-12 各モデルにおける鉛直荷重・水平横荷重載荷時でのケーブル最大張力

ケーブル安全率 $v_c$	3.5			2.5	
アーチリブ傾斜角 $\theta_a$ (°)	90	80	80		
鉛直荷重 ( $\alpha_{Lu}$ )	164.4	159.1	209.8		
水平横荷重 ( $\alpha_{Wu}$ )	114.2	127.3	190.3		

モデル化し、弾塑性有限変位解析を行った。解析ケースは概略試設計と同様とし、載荷荷重は、式(1),(2)に示す鉛直荷重と水平横荷重を載荷した。

表-11 に各モデルの終局荷重パラメータを示す。この表より、全てのモデルにおいて道示で期待されている安全率  $\alpha_{Lreq}=1.7$  ,  $\alpha_{Wreq}=1.36$  を満足することがわかる。従って、MFC ニールセンローゼ橋は、従来のニールセンローゼ橋と同様な設計法を用いて設計すれば、所要の耐荷力を確保することが可能である。

次に、ケーブルの最大張力を調べる。表-12 が示すように、鉛直荷重載荷時に着目し、終局状態でのケーブルの最大張力をケーブルの引張荷重と比較すると、ケーブルの引張荷重の半分以下である。ただし、この結果は橋梁全体として、一番不利と考えられる活荷重の載荷状態を作用させた場合の結果であり、ケーブルの張力が最大となる載荷状態ではない。

そこで、図-6 に示すように、鉛直荷重を考慮した設計時に得られた、最大張力を有するケーブルに不利に働くような活荷重載荷状態で鉛直荷重載荷を行った。解析モデルはケーブルの安全率が  $v_c=2.5$  のモデル(バスケットハンドル型)である。載荷荷重は、死荷重および図-6 に示す活荷重とした。図-7 に終局状態および荷重パラメータ  $\alpha_L=1.0$  ,  $\alpha_W=1.0$  付近の張力分布を示す。この図より、終局状態時の最大張力が 358.6kN となり、降伏までにまだ若干の余裕があり、弾性範囲内の挙動を示していることがわかる。

#### 4. まとめ

縦長断面よりも横長断面の方が終局荷重に対応する荷重パラメータ  $\alpha_{Lu}$  ,  $\alpha_{Wu}$  は大きくなり、横長断面が、鋼重・耐荷力において有利である。

バスケットハンドル型は平行弦型よりも  $\alpha_{Lu}$  ,  $\alpha_{Wu}$  が大きく、鋼重・耐荷力において有利である。

MFC ニールセンローゼ橋は、安全率が小さい場合でも従来モデルに近い挙動を示すため、ケーブルの安全率を小さくしてもアーチリブの面外座屈に関する照査・設計は従来のニールセンローゼ橋と同様としても良いと考えられる。

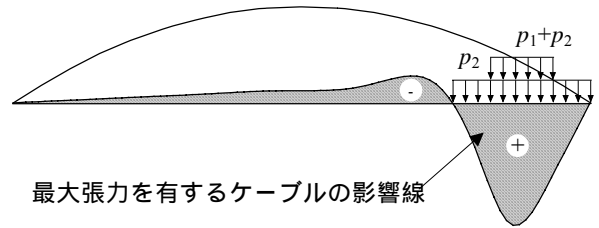


図-6 ケーブルに不利に働く活荷重載荷状態

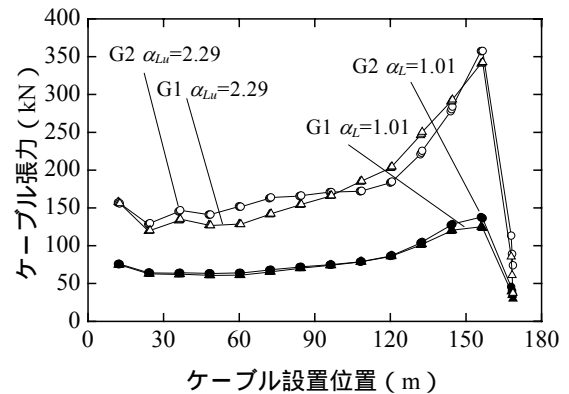
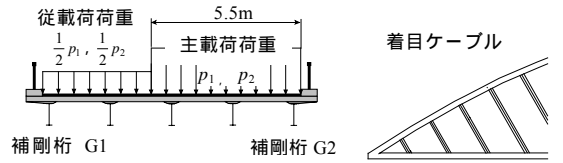


図-7 張力分布 (ケーブルに不利に働く鉛直荷重載荷時・ $v_c=2.5$ )

ケーブルに不利となる活荷重載荷状態で MFC ニールセンローゼ橋の弾塑性有限変位解析を行った結果、ケーブルの安全率が  $v_c=2.5$  の場合でもケーブルは弾性域内の挙動となり、ケーブルの安全率を従来のニールセンローゼ橋よりも小さく設計しても橋梁全体の耐荷力への影響は少ない。

今後、MFC ニールセンローゼ橋のケーブル定着部の力学的挙動や疲労挙動などを明らかにするために、数値解析、実験等による検討を行う必要がある。

#### 参考文献

- 1) 高機能な部材を用いた新しい橋梁の開発に関する共同研究グループ (HBM): 高機能な部材を用いた新しい橋梁の開発に関する調査および研究, 平成14年度土木学会関西支部共同研究グループ報告書, 2003.
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 共通編, 鋼橋編, 丸善, 2002.
- 3) 北田俊行・大南亮一・丹生光則・田中克弘: ケーブルを用いた鋼橋耐荷力解析用の汎用プログラム開発, 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, Vol.13, 日本鋼構造協会, pp.89~94, 1989.