ケーブル金物の設計法に関する基礎的研究

BASIC STUDY ON DESIGN METHOD FOR METAL FITTING OF CABLE

斎藤 公男*, 岡田 章**

Masao SAITOH and Akira OKADA

Cable made by bundling fine high tensile strength materials has flexibility and the strength to weight ratio is high. Also a great advantages of cable is that there is no limit to the length of members from a manufacture and a transportation view point. When applying cables to structures, it is effective to use the "middle clamp jointing method" in order to make the best economical use of both the properties of cables and their advantages over other materials. This method, in which other members are connected to the middle part of a cable, has the most distinctive characteristic that a single long cable can be used continuously without being cut at the clamping part unless absolutely necessary. This paper proposes a design method for a metal fittings for the cable structures by carrying out both experiments and analyses on the following items.

(1) Principal factors for the design of metal fittings used for the middle clamp jointing.

(2) A method for establishing an appropriate safety factors for the metal fittings of cable.

Keywords: Cable structure, String, Metal fitting of cable, Clamping force, Safety factor

Middle clamp, End clamp

ケーブル構造, ストリング, ケーブル金物, 把握力, 安全率

中間クランプ金物, ケーブル端末金物

1. はじめに

近年我国では、張弦梁構造^{3) 4)}やガラスファサードの支持構造⁵⁾⁶⁾等に見られるようにケーブルを用いた建築物が増加する傾向にある。これは特有の性質（柔軟性、長尺性、高強度）を有するケーブルを、空間構造や大スパン構造のストリング^{7) 8)}として使用した場合、構造・施工法等の面で合理的な解を与えると共に、魅力的な構造表現や造形的自由度が可能となることが社会的に認知されつつある結果とも捉えられよう。

さらに「建築構造ケーブル設計施工指針¹⁾」や「ケーブル構造設計指針²⁾」など、設計時に主な拠所となる設計法の整備が進められていることも一因であろう。これらは、機能、形状、規模、構成、荷重面で多岐にわたる建築のケーブル構造に対して、構造計画や設計に関する基本的な考え方を示したものと評価できる。

しかしこのような状況にも関わらず、我国の建築物に対するケーブルの適用例は、欧米に比べるとかなり少なく、ストリングとしてはロッドが一般的に使用されているのが現状である。強度に対するケーブル本体のコストはロッドと大差ないこと、強度や運搬面においてケーブルがロッドに比べると卓抜した性能を有することを考慮すると、ストリングとしてケーブルが一般的に使用されていない我国の状況は、特殊とさえ思える。

この原因としては、ケーブルに対する法的規制の存在以外に、ケーブルの設計法と施工に関する技術的蓄積、特にディテール設計に関わるデータが未整備であることがあげられる。溶接が不可能なケーブルでは、ケーブル相互あるいはケーブルと他部材との接合部には、特殊な接合方法の考案や設計思想が必要となるため、後者のディテール設計の内、特に接合部に関する設計データの不足はケーブルの普及を妨げる大きな要因と考えられる。例えば現行の接合部の設計法は、車輛荷重等を対象とした橋梁分野で蓄積された太径ケーブルの材料データ^{9) 10)}に基づいて構築されたものであり、細径ケーブルを用いた構造が大部分を占める建築物に適用した場合、接合部などの規模が大きくなるなど、意匠面・コスト面でケーブルの適用を躊躇させる問題が発生しがちである。さらに著者らの知る限りでは、この建築物への適用を念頭に置いた接合部に関する研究は未だ報告されていないのが現状である。このように、建築の要求機能に対応した、材料データの蓄積や設計法の確立が望まれている。

ケーブル構造の接合部は次の三種類に大別できる（図1）。

- (1) ケーブル端末部：ケーブルの端末には、ソケット止めや圧縮止めなどのケーブルと一体化した金物が一般に使用される。
- (2) ケーブル中間部・屈曲部やケーブル交差部：これらの接合部ではケーブルを切断しないで連続使用するため、ケーブルと分離

本論文の一部は文献14)～16)に報告している。

* 日本大学理工学部建築学科 教授・工博

** 日本大学理工学部建築学科 助手・工修

Prof., Dept. of Architecture, Nihon University, Dr. Eng.
Research Assoc., Dept. of Architecture, Nihon University, M. Eng.

図1 ケーブル構造の接合部の種類

した摩擦止めの金物または一体化した圧縮止めの金物を使用し、クランプ接合（ケーブルを固定）あるいは滑動接合（ケーブルの滑りを許容）により、安定した力の釣合いを形成する。

(3)定着部²⁰⁾：ケーブルと支持構造などとの間に設けられるインターフェースとしての部位を指す。

これらの接合部の設計時における特有の課題を以下に示す。

- (1)初期張力（PS）導入方法への配慮
- (2)支持架構等の製作・施工誤差や巻き取り・運搬に伴うケーブル長の微小変化への対応
- (3)ケーブル張力の不釣合力（接合部の両側に生じるケーブル張力の差）に対する抵抗
- (4)張力保持機構・減衰機構の組み込み
- (5)妥当性のある安全率の設定
- (6)コストと要求性能のバランスを考慮した設計法の確立

これらの課題を分析すると、ケーブルと一体化あるいは分離した形で、ケーブル本体に接触して取り付けられる金物、すなわち「ケーブル金物」の設計と大きく関わっていると考えられる。

本論では、以上の諸点を踏まえて、ケーブル中間部に用いられる摩擦止め方式のクランプ接合（以下「中間クランプ接合」）とケーブル端末部の接合を対象として、

(1)中間クランプ接合に用いられる金物（以下「中間クランプ金物」）

の設計のための主要因子

(2)中間クランプ金物とケーブル端末部の金物（以下「ケーブル端末金物」）等のケーブル金物の適正な安全率の設定の方法

について、実験と解析の両面から検討を加え、ケーブル金物の設計法について提案を行うものである。ここで(1)の「中間クランプ接合」は、一本のケーブルをできるだけ長い状態で連続的に使用するために不可欠な接合であり、ケーブルの特性や経済性を発揮することを指向した基本的な方式である。

本論では、まず(1)において中間クランプ金物の設計時の重要な因子である把握力、摩擦係数、軸力低下係数、許容側圧等の設定値の妥当性の評価のために、以下の項目について検討を行った。

- ①中間クランプ金物の把握性能の評価（滑動実験・付加荷重実験）
- ②中間クランプ金物における滑りの発生がケーブル強度の低下に及ぼす影響（引張疲労試験）
- ③同様の滑りの発生が構造システムに及ぼす影響（解析）

④側圧がケーブル強度の低下に及ぼす影響（引張（疲労）試験）

次に(2)においては、上記①～④で得られた性能に基づいて適正な安全率の設定のための基本的な考え方を提案した。これらは構造システム全体の安全率とケーブル金物の安全率の整合性を図ることを目的としたものである。本論では、張弦梁構造を対象として終局状態に着目した中間クランプ金物およびケーブル端末金物の設計法の提案を行い、ケーブル金物の縮小化と合理化の可能性を示す。

2. 中間クランプ金物の把握力の実験

2.1 中間クランプ金物の要求機能

ケーブルを建築物に適用する際、ケーブル特有の性質（柔軟性、長尺性、高強度）や有利性を経済的に発揮させるためには、以下の諸点に注意を払う必要がある。

- ・ケーブルをできるだけ長い状態で使用する。
- ・ケーブル長の調整を行う箇所を少なくする。
- ・少ない箇所、かつ小さな力で、所定のPS量を導入できる。
- ・ケーブル金物の数の削減や、機構の簡素化を図る。

これらを踏まえると、ケーブル構造においては一本の長いケーブルの中間部に他の部材を接合する方式（中間クランプ接合）の適用が有効となる。この中間クランプ接合部に用いられる中間クランプ金物には、以下の機能が要求される。

- ・クランプ部でケーブルを切断しない。
- ・接合部の構成部材や機構はできるだけ単純なものとする。
- ・クランプ部の両側のケーブルの張力差（以下「滑動力」）により生じる滑りに抵抗する。

図2に我国で最近のケーブル構造の事例を取り上げ、設計荷重時に中間クランプ部に生じる滑動力を示す。張弦トラス^{11) 12)}、テンセグリック・トラス¹³⁾といったトラス抵抗系を有する構造システムにおいては、滑動力（ $T_1 - T_2$ ）が大きくなる傾向がある。このため中間クランプ部分の設計においては設計用の滑動力の評価、必要把握力の設定、抵抗メカニズムの評価等が特に重要となる。

2.2 中間クランプ金物の構成

前述したように、中間クランプ金物には滑動力に抵抗する性能（把握力）が求められる（図3）。クランプ金物の設計時に目標とされる把握力の大きさ G_0 は、想定される滑動力の大きさ ΔT 以上に設定され、両者の関係は安全率 γ を用いて次式で表される。

図2 ケーブル構造の中間クランプ部に生じる滑動力の大きさの比較

図3 ケーブル張力と滑動力

図4 中間クランプ接合

$$Go = \nu \times \Delta T \quad (1)$$

中間クランプ金物に一般的に採用される摩擦止め方式は、ケーブルを両側から挟み込む二枚のプレートと、両プレートを接続するボルトにより基本的に構成され、把握力はボルトによりケーブル軸の直交方向に加えられた圧縮力（締付力）に起因する摩擦により得られる（図4）。中間クランプ金物の実例を図5に示す。中間クランプは比較的曲げ剛性の高いプレートを使用したものと、プレートの弾性を期待したものの二種類に大別できるが、本論では我国の建築分野で適用例が多い前者を対象とする。

2.3 現行の中間クランプ金物の設計手法と問題点

中間クランプ金物の設計は、通常以下の順序で行われる。

- ① 想定される滑動力 ΔT の算定。
- ② ΔT に抵抗するために必要な把握力 (Go) の設定（図6(a)式）。
- ③ Go を生じさせるためのボルト締付力 (N) の設定（図6(b)式）。
- ④ 締付力を生じさせるために必要なボルト径と本数の設定。

※ 本研究の対象外

図5 中間クランプ金物の一例

《設計用把握力: Go 》	$Go = \nu \Delta T$	--- (a)
《必要締付力: N 》	$N = \frac{Go}{m \mu k}$	--- (b)
《必要クランプ長さ: L 》	$L = \frac{1}{fp d} N$	--- (c)

Go : 設計用把握力（滑り耐力）
 ν : 安全率（長期 $\nu=3$ 、短期 $\nu=2.2$ ）
 ΔT : 滑動力（ $= |T1 - T2|$ ）
 m : 締付部形状により定まる形状係数（推奨値 $m=2$ ）
 μ : 摩擦係数（スチール $\mu=0.15$ ）
 k : 軸力低下係数（通常 $k=0.7$ ）
 fp : ケーブルの許容側圧
 d : ケーブル径（金物と接触するケーブルの幅）

図6 クランプ金物設計式（現行）¹⁸⁾

⑤ 許容側圧 (fp) に基づくプレート長の算定（図6(c)式）。

⑥ プレートの曲げ耐力に基づくプレート厚さの算定。

これらのうち②③の把握力と締付力の設定は④～⑥の算定の基本となり、クランプ金物の大きさを決定するため、意匠面やコスト面に大きく関わる。しかしながら現行の設計法では、特に安全率 (ν) と許容側圧 (fp) の二つの値に関して設定根拠が明らかにされておらず、妥当性のある適正值の設定が望まれているのが現状である。

3. 中間クランプ金物の把握力の評価－滑動・付加荷重実験

3.1 実験概要

本実験は、ケーブル種、クランプ部における折れ角、金物の形状等が中間クランプ金物の把握力に及ぼす影響を定量的に評価し、設計用把握力の設定に関わる基本資料を得ることを目的としている。

実験はクランプ金物の把握性能に着目した「滑動実験」と、付加荷重時のクランプ金物の性状を評価するための「付加荷重実験」を

実施した。それぞれの実験装置を図7と図8に示す。試験体は、実際のケーブル構造で標準的に採用されている規模・形状のものを原寸で使用することとした(図9・10)。実験パラメータを表1に示す。使用金物の内、「口元のみR」は、ケーブルに折れ角が発生する部分の溝のみ曲面加工したものであり、クランプ金物の標準化と簡素化を意図したものである。

滑動実験はケーブルに初期張力(1.0tf)を発生させた状態で、束下部のプレートによりケーブルをクランプし、ケーブルの片端部のジャッキで張力(T1)を導入することで滑動力を発生させた(図7)。滑動力の大きさは、クランプ両側の張力(T1、T2)をロードセルによって測定することにより評価した。一方、付加荷重実験は初期張力の発生後、束内部に別途設置したジャッキで束を伸長させ、ケーブルに下向きの荷重を加えた(図8)。

なお、ケーブル張力は両端のロードセル、プレートを締付けるボルトの軸力はボルトに埋め込んだ歪ゲージ、ケーブルのクランプ部における滑り量は高感度変位計によりそれぞれ測定を行った。

3.2 滑動実験結果および考察

図11a) b) に、ケーブルの折れ角が 0° の滑動実験結果を、締付力(ボルト4本の軸力合の目標値)をパラメータにして示す。図a)の縦軸は、クランプに生じる滑動力を締付力で無次元化した値であり、横軸はクランプ金物からのケーブルの滑り出し量を示す。

グラフよりケーブルが最初に滑り出す無次元化滑動力は0.25~0.3とほぼ一定値を示しており、クランプ金物の締付力と把握力の間の線形関係が確認された。この値は規準式の推奨値 $m\mu = 0.3$ (cf. 図6(b)式)とも良い一致を示している。またケーブルの初期滑りの後、把握力が大きくなる傾向も得られている。この把握力の増加量は締付力と共に大きくなる傾向があることから、ケーブルの締付によるケーブル径の減少に起因していると想定できる。すなわち滑り発生時に、クランプのケーブル挿入部分で、締付けにより生じたくびれが一種の楔のように機能するものと考えられる。本論では、このことによりプレートの締付けにより発生する摩擦力以上に滑り抵抗が増加する効果を「楔効果」と呼ぶ。

T1の張力の増大に伴い、ボルト軸力はT2側に比べてT1側の方が小さくなる傾向が得られている。またこの傾向は、締付力が大きくなるほど顕著に現れており(図11c)、上記楔効果の影響と考えられる。締付力(ボルト軸力の合計値)はケーブルの短期許容引張力($T=7.86\text{tf}$)時において最大約94%まで減少しているが($N=16\text{tf}$)、規準の推奨値($k=0.7$)の1.34倍に留まっている。

図12に締付力が一定(目標値: 4tf)時の結果を、ケーブルの折れ角 θ をパラメータにして示す。 θ が大きくなるにつれて把握力が大きくなる傾向が得られている。これは初期状態の束を圧縮する力に伴う存在摩擦力の効果と評価できる。

図13は締付力が一定(目標値: 8tf、 $\theta=0^\circ$)時の結果を、ケーブル種をパラメータにしてロッドの結果と共に示したものである。スパイラルの場合、楔効果に起因する把握力の増加量は、ストランドと同程度現れている。一方、締付けによる径の縮小が微小なロッドではこの性状は見られない。

図14に締付力の目標値が4tf、折れ角 θ が 20° の時の結果を、クランプ金物の形状をパラメータにして示す。口元のみR、大きなRとも把握力に関して顕著な差異はみられないことから、ケーブルの柔軟性を利用した「口元のみR」の適用性が確認され、クランプ

図7 実験装置(滑動実験)

図8 実験装置(付加荷重実験)

図9 金物形状

表1 パラメーター一覧

ケーブルの種類	金物の形状	ケーブルの折れ角	金物の※締付力	試験体数
ストランドロープ 7×19 φ16	大きなR	20°	4, 8 (tf)	7体 (4, 8tf)
		10°	4, 8, 16 (tf)	
スパイラルロープ 1×19 φ16	口元のみR	20°	4, 8 (tf)	3体 (16tf)
		10°	4, 8, 16 (tf)	
		0°	4, 8, 16 (tf)	

※規準で設定されている締付力の許容値は
ストランド12.80 tf、スパイラル 15.36 tf

図10 金物詳細図

金物の標準化や簡素化につながると期待できる。

3.3 楔効果の評価

前述した初期滑りの発生後の把握力の増加、すなわち楔効果を適正に評価することは、設計の合理化につながる重要な項目と考えられる。ここでは楔効果を評価するための基本式を提案する。クランプ部の締付力によりケーブル径が減少した状況を表わしたモデル(図15)を用いると、当該部分の釣合条件から、初期滑り発生時の初期把握力 G_0 に対する楔効果により増加した把握力 G_u の比 β が次式のように求まる。

$$\beta = \frac{G_u}{G_0} = \frac{\tan \alpha}{\mu} + 1 \quad (2)$$

α は楔効果によりケーブルに作用する圧縮力の傾斜角を、プレート面の法線とのなす角で表わしたものである。ここで μ (摩擦係数)として0.15(スチール)を用いて、さらに全実験結果より得られた β の値(表2)より α を算定するとストランドで $7.9 \sim 14.1^\circ$ 、

図11 クランプの締付力による比較 (ストランド・ $\theta = 0^\circ$) 図12 ケーブルの折れ角による比較 (ストランド・ $N = 4$ tf)

図13 ケーブル種による比較 図14 金物の形状による比較

スパイラルで $4.5 \sim 7.9^\circ$ と求まる。ここで α はケーブルの横圧方向の剛性 Kc と相関関係にあること(図16)と、 Kc がケーブルの空隙係数 ξ ²⁾(ストランド $\xi = 0.39$ 、スパイラル $\xi = 0.24$)に関係することを考えると、上記 α 、 β の値は他の素線構成にも適用可能と推察できる。なお図16の Kc は、ボルト締付力とプレート金物の間隔の変化量の測定結果(図17・18)より求めたものである。

3.4 付加荷重実験結果および考察

図19に $\theta = 20^\circ$ (ストランドロープ)の付加荷重実験結果を、ボルト軸力の変化に着目して金物形状毎に示す。「大きなR」を有する金物では、付加荷重の増大に伴うボルト軸力の減少傾向が顕著

図15 楔効果の評価モデル

表2 β の実測値

・ストランドロープ									
N	試験体数	β_{max}	β_{min}	$\bar{\beta}$	σ	$\bar{\beta}$	σ	$\bar{\beta}$	σ
4tf	7	2.67	2.11	2.27	0.19				
8tf	7	2.40	1.92	2.15	0.16				
						2.21	0.19		
・スパイラルロープ									
N	試験体数	β_{max}	β_{min}	$\bar{\beta}$	σ	$\bar{\beta}$	σ	$\bar{\beta}$	σ
4tf	5	1.92	1.53	1.73	0.15				
8tf	5	1.93	1.76	1.86	0.08				
						1.80	0.14		

$\bar{\beta}$: 平均 σ : 標準偏差

図16 $\alpha - Kc$ 関係

図17 クリップゲージ取付け図

図18 プレート間変位(s)とボルト軸力の関係

に現れている。また短期許容引張力($T1 = 7.86$ tf)時のボルト軸力の初期値に対する割合は、傾斜ケーブル側のボルト軸力($N1$)が約40%、逆側($N2$)が約75%となっておりケーブル張力の減少に応じた傾向が得られている。一方「口元のみR」のボルト軸力の減少傾向はボルト位置による差異は見られず、また短期引張力時のボルト軸力は初期の約80%と減少率も比較的小さい。同様の性状は、 $\theta = 10^\circ$ 、スパイラルケーブルの場合にも得られており、クランプ金物の簡素化を指向した「口元のみR」の金物は、ボルト軸力の低下率を比較的小さく設定できる可能性があることが把握された。

4. 滑りの発生が構造システムおよびケーブルに及ぼす影響

4.1 構造システムに及ぼす影響

上述した楔効果は初期滑りの発生後、ある程度の滑りの発生と共に発揮される。このため楔効果を考慮した安全率の設定の際には、滑りの発生が構造システムに及ぼす影響を評価しておく必要がある。

ここでは、張弦梁構造を対象として、滑りの発生が応力・変形に及ぼす影響について解析的に検討を行う。図20に張弦梁構造を対象として、束とストリングの交点における不釣合力 $\Delta T'$ (滑動力 ΔT と把握力 Go の差)と、当該部分に生じる滑り量 ΔS の関係を示す。また図21はストリングのサグ・スパン比(κ)が一定下($\kappa = 0.08$)における $\Delta T'$ と ΔS の関係を、束位置(n)をパラメータとして示したものであるが、ケーブルの折れ角が小さいほど滑り量が小さくなる傾向が得られている。図22に滑り発生後の応力・変形と滑り量の関係を示す。初期滑り発生後、把握力の増大と共に滑動力と不釣合力が減少することを勘案すると、曲げモーメントと変位量の増加量は0.01~0.1%程度と評価でき、滑りの発生が構造システムに及ぼす影響は無視できるオーダーだと考えられる。

図19 付加荷重時のボルト軸力の変化
(ストランドロープ、N=4tf, $\theta=20^\circ$)

4.2 滑りの発生がケーブルに及ぼす影響

滑りの発生がケーブルに及ぼす影響を把握するため、滑動力実験後のケーブルを用いて、引張疲労試験を行った。平均荷重をケーブルの規格破断荷重Fbの1/3（長期許容値）、荷重振幅を35kgf/mm²（約0.25Fb）と設定した。結果（図23）より、ケーブル種や締付力に関わらず、滑り発生部分では切断していない。これより滑りの発生による疲労強度の低下は無いと評価できる。

5. 許容側圧に関する検討

「設計施工指針」で標準とされている許容側圧値（図24※参照）は、実在の吊橋の塔頂サドル部の推定側圧（平行線ストランド）から設定されている¹⁹⁾。ここでは現行の許容値の妥当性を検証するため、クランプ金物を取り付けた状態で側圧値をパラメータとして、引張疲労試験と静的引張試験を行った。後者では平均荷重をFb/3、荷重振幅 $\Delta\sigma_r$ を15、35kgf/mm²と設定した。

疲労試験の結果を図24に示す。 $\Delta\sigma_r=35\text{kgf/mm}^2$ （約0.25Fb）の場合、クランプ金物の口元で破断していることから側圧の影響が見られる。しかしケーブルの設計用許容引張力の長短期の差（約0.12Fb）と比較すると、実験時の荷重振幅値は過大と考えられる。一方 $\Delta\sigma_r=15\text{kgf/mm}^2$ （0.1Fb）の場合は、側圧に関わらずN=2 $\times 10^6$ を満足し強度低下は見られない。引張試験ではクランプ金物の口元で破断している試験体もあるが、いずれも規格以上の破断荷

図20 検討モデルと滑り量の一般式

図22 応力・変形-滑り量関係
(解析結果)

重を示し、側圧による有意差はない（図25）。以上の結果は少ない試験体から得られたものであるが、現行の許容側圧には、見直す余地があると考えられる。

6. ケーブル金物の安全率の設定方法の提案

6.1 ケーブル金物に対する安全率の考え方

現行の中間クランプ金物の設計法 (cf. 図6) では滑りに対する安全率 ν として、長期3、短期2.2 (ケーブルと同値) が標準とされている¹⁷⁾。しかし滑動実験結果で示したように、楔効果により把握力が初期滑動力の1.8~2.5倍に見込めること、滑りの発生がケーブルの強度低下に影響を及ぼさないこと、さらにケーブルのポアソン比やクリープによるボルトの締付力の低下は軸力低下係数 k (cf. 図6) で別途考慮されていること等を考慮すると、張弦梁構造のように滑り発生が直ちに構造物の耐力の低下に結びつかない構造システムに対しては、安全率を小さく設定できる可能性もあろう。

またケーブルの端末金物や定着部はケーブル破断時における弾性域の保持あるいはケーブルに発生する張力に対する許容値の満足等を目標として設計されることが一般的である。構造合理性の観点からは、構造システム全体の安全性を踏まえ、バランスのとれた安全率の設定が重要であると考ええる。

ここでは張弦梁構造を対象として、終局状態に着目した中間クランプ金物およびケーブル端末金物の設計法の提案を行い、ケーブル金物の縮小化と合理化の可能性を示す。

6.2 張弦梁構造のケーブル金物の必要耐力に関する検討

(1) 終局時のケーブル張力

張弦梁構造を事例として、積雪分布荷重に対する終局状態を算定し、金物の必要耐力について論じる。算定にあたって一般地域 (Model A) と多雪地域 (Model B, C) に対して許容応力度設計より断面を求めた3モデルを設けた。ここでModel BとCの違いは、変形制限 ($\delta \leq L/300$) の考慮の有無にある (図26)。なおBeamの降伏条件として次式を用いた。

$$M_{pc}/M_p + (N/N_y)^2 = 1 \quad (3)$$

図27に検討結果を示す。いずれのモデルもストリングが降伏する前にBeamが降伏し、図に示す崩壊機構を形成する。なおケーブルの破断荷重 F_b に対する崩壊時のケーブル張力は、Model Aで64%、Bで43%、Cで65%となった。

(2) 中間クランプ金物の必要耐力の検討

ここで(1)の事例を対象として中間クランプ金物の把握力に関する必要耐力を求めてみる。検討条件を以下に示す。

- ① 想定荷重下の滑動力の最大値 ΔT_d (長短期共) に対して初期把握力 G_o で抵抗する ($\nu \Delta T_d \leq G_o$; ν : 安全率)。
- ② 構造体の終局時の滑動力 ΔT_u に対して、楔効果を考慮した把握力 G_u で抵抗する ($\Delta T_u \leq G_u$; $G_u = \beta G_o$)。

$\nu = 1$ 、 $\beta = 2$ とした場合、2条件を共に満足する中間クランプ金物の必要把握力を各Modelに対して求め、従来設計の結果 ([]内の数値) と比較すると、次のようになる (図28)。

Model	$G_o/\Delta T_d$	$G_u/\Delta T_u$
A	1 [2.22]	1.2 [2.67]
B	1.03 [2.45]	1 [2.38]
C	1.03 [2.38]	1 [2.45]

(3) ケーブル端末金物の必要耐力

現行のケーブル端末金物は、次の2種類の立場で設計されることが一般的である。

- ① ケーブルが破断荷重時に、金物が弾性を保持する。
- ② ケーブルの存在張力に対して許容応力度設計を行う。

図26 解析モデル

図27 解析結果

図28 ケーブル金物の必要耐力の算定例 (Model A: 一般地域)

これらは、主にケーブルで構成された構造システムあるいは、剛性確保の観点から断面を増したケーブルに対して、合理的な解を得ようとする考えである。しかし、張弦梁構造のように剛な部材とケーブルを組み合わせた構造システムでは、ケーブルより先に剛な部材が降伏することが多いため、終局強度の観点からは幾分合理性に欠ける場合もある。

以上の観点から、構造システムの終局状態に、ケーブル末端金物が降伏軸力 P_y に達するとの条件下で、金物の必要耐力を求めてみる。すなわち、終局荷重におけるストリング張力を末端金物の降伏軸力 P_y に等置すると、 P_y と最大発生張力 T_s の比は以下になる（cf.図28、[]内の数値は従来の設計①の場合）。

Model	P_y/T_s
A	1.66 [2.62]
B	2.06 [4.84]
C	2.00 [3.05]

上記(2)(3)の検討は一例について行った結果に過ぎないが、ケーブル金物を終局時の応力に基づいて設計することにより、安全性を保持しながら、合理的に金物を縮小化できる可能性があることが示唆された。

7. まとめ

本論では中間クランプ金物の把握力の評価実験、疲労試験、引張試験および数値解析で得られた性能に基づいて、終局状態に着目した中間クランプ金物とケーブル末端金物の適正な安全率の設定に関する検討を行い、金物の縮小化・簡素化の可能性を示した。検討の結果得られた新しい知見を以下に示す。

- (1)滑動試験の結果、ケーブルの初期滑りの発生後、把握力が大きくなる性状が得られた。これはケーブルの締付部分と非締付部分の径の差に起因する「楔効果」によるものと評価できる。さらに楔効果は、ケーブルの横圧方向の剛性やケーブルの空隙係数と関係する傾向があることを示した。
- (2)中間クランプ部におけるケーブルの折れ角が大きくなるに従って、把握力が大きくなる傾向が得られた。これは束の存在圧縮力に起因する摩擦力の効果と評価される。
- (3)ケーブルが金物から出る部分のみ溝部を曲面加工した「口元のみR」の金物は、把握力やボルト軸力の低下等に関して中間クランプ金物として十分適用可能な性能を有している。
- (4)滑動試験後のケーブルを使用した引張疲労試験の結果、滑りの発生が疲労強度の低下に及ぼす影響は認められなかった。
- (5)許容側圧の2倍まで締め付けた状態で、引張疲労試験と静的引張試験を実施した結果、ケーブルの耐力の低下は見られなかった。このことより、許容側圧値の見直しの必要性が示唆された。
- (6)張弦梁構造のみを対象とした検討ではあるが、滑りの発生が直ちに構造システムの性能低下には結びつかないことを、数値解析により示した。このことから、構造システムによっては、滑りに対する安全率を小さく設定できる可能性を示した。
- (7)張弦梁構造を一例として、ケーブル金物を終局時の応力に基づいて設計することにより、合理的に金物を縮小化できる可能性があることを示した。
- (8)以上の結果より、中間クランプ金物の設計時における必要把握

力 G_0 は、滑動力 ΔT に、滑りの発生が構造システムの性能低下に及ぼす影響や終局状態の応力を勘案した安全率 ν と、ケーブルの折れ角による存在摩擦力を考慮した係数を、乗じたもので評価できると考える。

今後さらにケーブル金物の設計法を充実させるためには以下の検討が必要であると考えます。

- (1)各種ケーブル（素線構成の種類、被覆の有無と種類、径）やブレード（材種、表面処理法）の組合せに対する、横圧方向の剛性や楔効果などの材料データの蓄積や信頼性の向上、及び楔効果の推定式の妥当性の検証。
- (2)許容側圧の適正な設定のための材料データの収集。
- (3)滑りの発生が各種構造システムに及ぼす影響度の把握。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、供試体の製作および疲労・引張実験の実施面で御協力を頂いた神鋼鋼線工業（株）の関係者に、また把握力の実験の実施と本論の作成に御尽力頂いた日本大学大学院 竹川正慶君（現 西松建設（株））に謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 日本鋼構造協会：建築構造ケーブル設計施工指針，1983
- 2) 日本建築学会：ケーブル構造設計指針・同解説，1994
- 3) M. Saitoh：Principle of Beam String Structure, Proc. of IASS (Madrid) vol.4, pp.17~38, 1979
- 4) 斎藤公男・岡田 章：建築におけるケーブル構造の課題と展開，鋼構造論文集第1巻3号，1994・9
- 5) 斎藤公男・岡田 章他：点支持方式のガラス・ファサードの力学特性に関する基礎的研究（その2），日本建築学会学術講演梗概集，pp.747~748, 1995
- 6) 斎藤公男監修：透明なデザインと建築技術，建築技術，1996・1
- 7) M. Saitoh and A. Okada：From Image to Technology - The Role of String in Hybrid String Structures -, Proc. of IASS (Stuttgart) vol.2, pp.663~670, 1996
- 8) 斎藤公男・岡田 章：ストリング式骨組架構（SKELSION）の構造概念と力学特性について，鋼構造論文集第1巻3号，1994・9
- 9) 例えば、日本道路協会：道路橋示方書，1990
- 10) 例えば、本州四国連絡橋ケーブルバンド設計要領（案），本州四国連絡橋公団，1978
- 11) 斎藤公男・岡田 章他：多雪地域におけるストリング式骨組架構（SKELSION）の適用，日本建築学会学術講演梗概集，pp.849~850, 1996
- 12) 斎藤公男・岡田 章他：多雪地域における木造複合張弦梁構造の構造特性に関する研究（その1）（その2），日本建築学会学術講演梗概集，pp.851~854, 1996
- 13) 斎藤公男・岡田 章他：ファサードに用いるテンセグリック・トラスの力学特性に関する研究（その1）（その2），日本建築学会学術講演梗概集，pp.1035~1038, 1998
- 14) 斎藤公男・岡田 章他：ケーブル金物の設計法に関する基礎的研究（その1），日本建築学会学術講演梗概集，pp.1019~1020, 1998
- 15) 斎藤公男・岡田 章他：ケーブル金物の設計法に関する基礎的研究（その2），日本建築学会学術講演梗概集，pp.1021~1022, 1998
- 16) 斎藤公男・岡田 章他：ケーブル金物の設計法に関する基礎的研究（その3），日本建築学会学術講演梗概集，pp.1023~1024, 1998
- 17) 文献1），p.27、文献2），pp.92~93
- 18) 文献2），pp.91~100
- 19) 文献1），p.26
- 20) 文献2），p.106

（1998年6月10日原稿受理，1998年11月2日採用決定）