

鉛直荷重および材料強度の不確実性を考慮した張弦梁構造の信頼性指標に関する基礎的研究

The study on the reliability of Beam String Structure exposed to vertical load

○石下善之¹, 石鍋雄一郎², 中島肇³

Yoshiyuki Ishishita¹, Yuichiro Ishinabe², Hajime Nakajima³

Abstract: In general, large-span steel buildings are more sensitive to snow loads. This is because steel roofs have a low dead load compared to other types of RC roofs and are designed to be safer against snow loads than against dead loads. However, snow load is a static, and if snow accumulation exceeds expectations, brittle collapse may occur due to a rapid decrease in bearing capacity. Moreover, in February 2014, heavy snowfall in the Tokyo metropolitan area caused the roof of a large-span building to collapse. In order to satisfy the conditional equation of the bearing capacity ratio that the string yields prior to the upper string member, which is a component in the design of beam string structures for the above problem, this study examined the relationship between the bearing capacity ratio by means of a reliability using LRFD coefficients.

1. はじめに

一般的に大スパン鋼構造建築物は雪荷重に対する影響が大きいと言われており、その要因はS造屋根が他のRC屋根などと比べて比較的固定荷重が小さく、固定荷重よりも雪荷重に対して安全性を持つ設計になるからである。しかし、雪荷重は静的荷重であり想定を超える積雪が生じれば急激な耐力低下による脆性的な崩壊が発生する可能性がある。現に2014年2月の首都圏の大雪では大スパン建築物の屋根崩壊が起きている^[1]。上記の問題に対して亀山ら^[2]は張弦梁構造(以下:BSSとする)を用いた大スパンの置き屋根式構造の設計において、想定を超える雪荷重時に構成部材である上弦材よりストリングが先行降伏するという耐力比の条件式を満たすことでBSSの脆性的破壊回避が可能であることを提案している。しかし、部材耐力には不確実性が存在し、条件式を満たす設計をした場合でも上弦材とストリングとの耐力のバランスが逆転すれば、必ずしも設計時に想定した崩壊形式で崩壊するとは限らない。以上のことより本研究では、まずストリングに用いられる構造用ケーブルの統計情報をまとめ、平均値と変動係数について検討を行う。次に、上弦材とストリングに異なる目標信頼性指標 β_T を用いた場合の耐力比との関係を考察することを目的とする。

2. 素材強度の不確実性と統計量

本章では、中島ら^[3]による構造用ケーブルの引張試験結果報告より、統計データに基づいた降伏応力度と破断応力度の平均値と変動係数について説明する。

2.1 構造用ケーブル引張試験

Table 1は引張試験の試験体一覧の抜粋である。試験体は構造用ストランドロープ(ST)、スパイラルロープ

(SP)を対象とし、3種類の素線構成、ケーブル径 ϕ 16, 18, および製造会社2社(T, S)の計10本とする。試験結果の応力度-ひずみ関係をFigure 1に示す。応力度-ひずみ関係は規格破断応力度 σ_b の2/3程度まで規格弾性係数Eに近い勾配でほぼ直線上に推移した。

Table 1. List of specimen of wire ropes

ケーブル種類	素線構成	ケーブル径 d (mm)	試験体名	種別	試験体数 (本)
ストランドロープ	7×7	16	ST16-T	ST1570	3
		16	ST16-S	ST1570	3
	7×19	18	ST18-T	ST1470	1
スパイラルロープ	1×19	16	SP16-T	ST1570	3

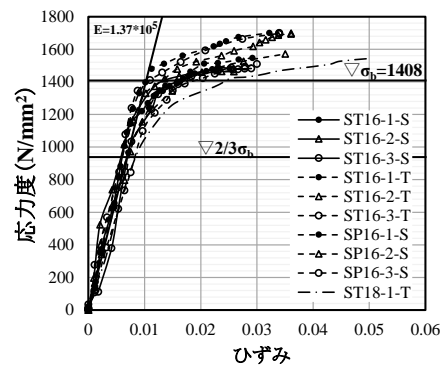


Figure 1. Stress-strain curve

Table 2. Experimental results of σ_y and σ_b

	規格破断応力度 σ_b (N/mm ²)	破断応力度 σ (N/mm ²)	σ/σ_b	降伏応力度 (N/mm ²)
ST16-1-T	1408	1549	1.10	924
ST16-2-T	1408	1591	1.13	949
ST16-3-T	1408	1563	1.11	933
ST16-1-S	1408	1492	1.06	891
ST16-2-S	1408	1492	1.06	891
ST16-3-S	1408	1492	1.06	891
SP16-1-S	1408	1633	1.16	975
SP16-2-S	1408	1633	1.16	975
SP16-3-S	1408	1633	1.16	975
ST18-T (平準化)	1408	1676	1.19	1000

次に、Table 2 に破断応力度の結果と破断応力度から換算した降伏応力度を示す。なお、構造用ケーブルには明確な降伏点がないため、降伏応力度に相当する値として $\sigma_y = 2/3\sigma_b$ を用いている。

2.2 素材強度の確率モデル

素材強度に関する統計量は Table 3 に示す。破断応力度の変動係数は 0.04 となり既往文献^[4]の報告と同じ値となった。降伏応力度は規格破断応力度 σ_b に対する平均値が 0.6 となり、また、変動係数は破断応力度を基にしているため同一の値となっている。

3. スtringの目標信頼性指標

本章ではBSSのStringに関して部材体積が最小かつ耐力比 ≤ 1.0 を満たす目標信頼性指標を考察する。耐力比の条件式は既往研究によるものとする^[2]。また、上弦材はH形鋼、荷重は固定荷重と雪荷重とし、Figure 2 に構造モデル、Table 4 に各パラメータに用いる確率モデルを示す^{[5][6]}。算出方法は以下に示す通りとする。信頼性理論に基づく荷重・耐力係数設計法(LRFD)では設計条件式は式(1)で表される。

$$\phi R_n \geq \sum_{i=1}^k \gamma_{Si} S_{ni} \quad (1)$$

ここで、 ϕ ：耐力係数、 γ_{Si} ：荷重係数、 R_n ：公称強度、 S_{ni} ：公称荷重効果である。式(1)中の R_n 、 S_{ni} を対数正規分布に近似し ϕ 、 γ_{Si} を次式とする。

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{1+V_R^2}} \exp(-\alpha_R \beta_T \sigma_{lnR}) \frac{\mu_R}{R_n} \quad (2)$$

$$\gamma_{Si} = \frac{1}{\sqrt{1+V_{Si}^2}} \exp(\alpha_{Si} \beta_T \sigma_{lnSi}) \frac{\mu_{Si}}{S_{in}} \quad (3)$$

ここで、 V_x ：変動係数、 α_x ：分離係数、 β_T ：目標信頼性指標、 σ_{lnx} ：対数標準偏差、 μ_x ：平均値である。

Figure 3 に算出結果のグラフを示す。横軸は上弦材の信頼性指標 β_b に対するStringの信頼性指標 β_s の比率を表しており、数字が大きくなる程Stringの破壊確率が小さくなることを表している。結果より β_s/β_b と α_s は正の相関を持つことがわかった。このことから、上弦材の β_b より小さな β_s を設定することで、耐力比の条件を満たした上で構造用ケーブルの部材体積を最小化することが可能であることがわかった。

4. まとめ

本研究では構造用ケーブルの素材強度に関する確率モデルを作成し、耐力比と信頼性指標の関係を LRFD により示した。今後は構造系の破壊確率を基にした目標信頼性指標の決定方法を検討する予定である。

Table 3. Statistical properties of σ_y and σ_b

	データ数n	平均値/基本値 (σ_b)	標準偏差 σ (N/mm ²)	変動係数 δ
降伏応力度	10	0.60	38.6	0.04
破断応力度	10	1.12	64.7	0.04

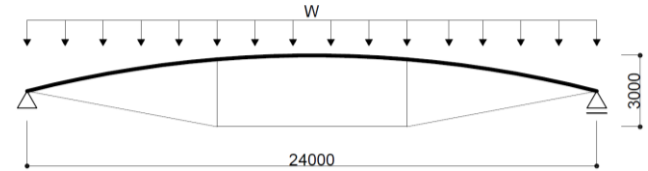


Figure 2. Analytical models of BSS

Table 4. The stochastic models of parameters

横座屈耐力 (λ_b : 横座屈細長比)	分布形		平均値/基本値	変動係数V
	$\lambda_b \leq 0.3$	$0.3 < \lambda_b \leq 1/\sqrt{0.6}$		
	$\lambda_b \leq 0.3$	—	1.19	0.14
	$0.3 < \lambda_b \leq 1/\sqrt{0.6}$	—	1.13	0.17
	$\lambda_b > 1/\sqrt{0.6}$	—	1.10	0.11
雪荷重S (東京) 50年最大	Gumbel分布		0.98	0.29
固定荷重 (700N/mm ²)	正規分布		1	0.1

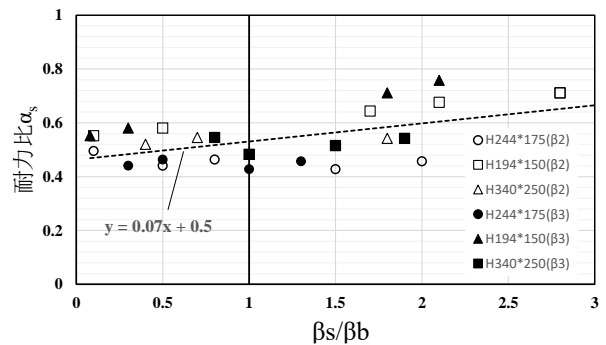


Figure 3. The relationship of reliability and α_s

【謝辞】

本研究の進行にあたり、神田順教授には貴重なご示唆、ご助言を頂きました。ここに厚く感謝いたします。

【参考文献】

- [1] 高橋徹, 千葉隆弘他:「2014年2月の大雪による建築物の被害」, 平成25-26年度科学研究費助成事業(科学研究費補助金), (特別研究促進費) 研究成果報告集, pp.62-71, 2014年8月.
- [2] 亀山, 石鍋他:「大スパン鋼構造建築物の対雪設計に関する基礎的研究—張弦梁構造の脆性的崩壊回避の条件式—」, 日本建築学会大会学術講演会梗概集(東北), pp.1061-1062, 2018年9月.
- [3] 中島肇, 山崎由美子他:「構造用ケーブルの応力-ひずみ関係に関する実験的研究」, 日本建築学会技術報告集, 第24巻, 第56号, pp.105-110, 2018年2月.
- [4] (独) 土木研究所:「鋼材料・鋼部材の強度等に関する統計データの調査」, 土木研究所資料, 第4090号, 2008年3月.
- [5] 日本建築学会:「鋼構造限界状態設計指針・同解説」, 丸善株式会社, 2010
- [6] 日本建築学会:「建築物荷重指針・同解説(2015)」, 丸善株式会社, 2015