

張弦梁構造の脆性的崩壊回避に関する基礎的研究

Avoiding brittle failure mode of beam string structure

○亀山涼季¹, 石鍋雄一郎², 中島肇²

*Ryoki Kameyama¹, Yuichiro Ishinabe², Hajime Nakajima²

Abstract: In late years, disasters caused by snow had been experienced even in light-snowfall region around Tokyo city. As for long-span steel roofs (e. g. Gymnastic hall), some cases of complete collapse had been reported. In this paper, failure mode of beam string structure is focused especially. The relationship between the elasto-plastic properties of the string and the beam strength is examined, suggesting conditional expression to avoid brittle failure of beam string structure.

1. はじめに

近年、首都圏を中心に少雪地域においても大雪による被害が報告されている。特に、2014年2月14日～16日に首都圏各地を襲った大雪は大規模な鋼構造建築物に被害をもたらした。筆者らは、張弦梁構造(以下 BSS と表記)の剛性比の相異により見られた弾塑性挙動を把握した。^{[1][2]}BSS の検討モデルでは梁の座屈に起因した急激な耐力低下が確認され、BSS 全体の弾塑性挙動とストリング材の降伏との関係が示唆された。斎藤ら^{[3][4]}により梁にトラスを用いた BSS の弾塑性挙動に関して研究されているが、BSS 全体の弾塑性挙動とストリングの弾塑性特性に関わる研究は筆者らの知る限り見られない。

BSS の梁は曲げモーメントに加え軸力が発生する。鋼構造塑性設計指針^[5]は、圧縮軸力と曲げモーメントを受ける柱の耐力を、梁の曲げモーメントによる横座屈耐力と柱の軸力による曲げ座屈耐力を導入した形式で定式化している。置屋根形式で単純支持の BSS ではストリング張力と梁軸力がほぼ等しいという特徴を有している。この特徴を利用し、ストリングの弾塑性特性と梁耐力の関係を整理し、BSS の脆性的崩壊回避の条件式の提案を行う。

2. BSS の弾塑性特性

筆者らは、単純支持の BSS に鉛直等分布荷重を作用させた誇張増分解析により Figure1 の結果を得た。^[1]モデル A~C のストリングは共通で、梁断面は A が最小で C が最大となっている。モデル A は終局設計用荷重をクリアしているものの急激な耐力低下が発生している。想定外の外力が加わった場合、急激な耐力低下ではなく、靱性のある崩壊過程が望ましい。Figure2 には最大荷重時ストリングの応力とひずみを示しているが、モデル A 以外の B, C ではストリングが先に降伏することによって

急激な耐力低下が回避された。従って、ストリングの降伏荷重と梁耐力の大小関係が BSS 全体の弾塑性に大きく影響を及ぼすと考えられる。

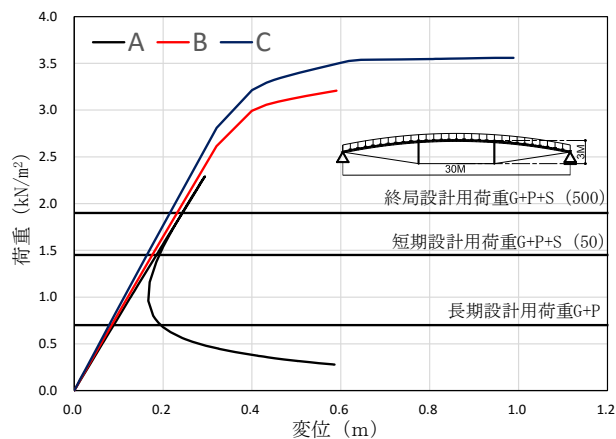


Figure 1 Load-Vertical deflection relationship

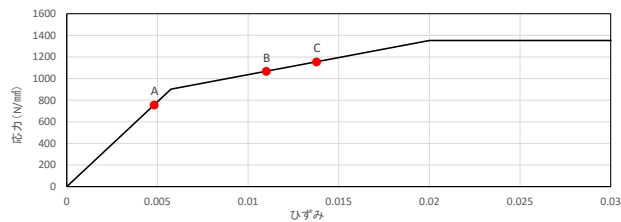


Figure 2 Stress-Strain relationship for string (Pointing Peak Load)

3. 梁の曲げ座屈耐力と横座屈耐力

張弦梁構造には圧縮軸力および曲げモーメントが発生しているため、曲げに対する横座屈耐力および圧縮軸力に対する曲げ座屈耐力を考慮する必要がある。鋼構造塑性設計指針^[5]より、以下のように算定をする。

・圧縮軸力を受ける梁の曲げ座屈耐力

$$\lambda_c \leq p\lambda_c: N_{cr} = N_Y \quad (1. a)$$

$$p\lambda_c < \lambda_c \leq e\lambda_c: N_{cr} = \left(1.0 - 0.5 \frac{\lambda_c - p\lambda_c}{e\lambda_c - p\lambda_c}\right) \cdot N_Y \quad (1. b)$$

1 : 日大理工・院(前)・建築 2 : 日大理工・教員・建築

$$e\lambda_c < \lambda_c: N_{cr} = \frac{1}{1.2 \cdot \lambda_c^2} \cdot N_Y \quad (1. c)$$

記号

- N_{cr} : 曲げ座屈耐力
- λ_c : 曲げ座屈細長比 = $\sqrt{N_Y/N_e}$
- $e\lambda_c$: 弾性限界細長比 = $1/\sqrt{0.6}$
- $p\lambda_c$: 塑性限界細長比 = 0.15
- N_Y : 降伏耐力
- N_e : 弾性曲げ座屈耐力 = $\pi^2 \cdot E \cdot I / \kappa l_c$
- E : ヤング係数
- I : 座屈軸まわりの断面二次モーメント
- κl_c : 圧縮柱の曲げ座屈長さ

• 曲げを受ける梁の横座屈耐力

$$\lambda_b \leq p\lambda_b: M_{cr} = M_P \quad (2. a)$$

$$p\lambda_b < \lambda_c \leq e\lambda_b: M_{cr} = \left(1.0 - 0.4 \frac{\lambda_b - p\lambda_b}{e\lambda_b - p\lambda_b}\right) \cdot M_P \quad (2. b)$$

$$e\lambda_b < \lambda_b: M_{cr} = \frac{1}{\lambda_b^2} \cdot M_P \quad (2. c)$$

$$M_e = C_b \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y \cdot G \cdot J_T}{l_b^2} + \frac{\pi^4 \cdot E \cdot I_y \cdot E \cdot I_W}{\kappa l_b^4}}$$

$$C_b = 1.75 + 1.05 \cdot \kappa + 0.3\kappa^2 \leq 2.3$$

記号

- M_{cr} : 横座屈耐力
- λ_b : 横座屈細長比 = $\sqrt{M_P/M_e}$
- $e\lambda_b$: 弾性限界細長比 = $1/\sqrt{0.6}$
- $p\lambda_b$: 塑性限界細長比 = $0.6 + 0.3 \cdot \kappa$
- κ : 材両端または横座屈補剛間隔の曲げモーメント比 = $M_2/M_1, |M_1| \geq |M_2|$ かつ複曲率曲げの時を正とする.
- M_P : 全塑性モーメント
- M_e : 弾性横座屈モーメント
- $E \cdot I_y$: 弱軸回りの曲げ剛性
- $E \cdot I_W$: 曲げねじり剛性
- $G \cdot J_T$: サンプナンねじり剛性
- l_b : 材長または横座屈補剛間長さ
- κl_b : 材端及び補剛点の支持状態に応じて算定される横座屈長さであり、 $\kappa l_b = l_b$ とする.
- C_b : モーメント係数、横座屈補剛区間で曲げモーメントが直線的に変化する場合の略算式

4. 脆性的崩壊回避の条件式の提案

梁耐力がストリングの降伏軸力より大きくなれば脆性的崩壊が回避されることから、3.a 式の条件を満足することが必要と考える。また、単純支持では、強軸方向への座屈は存在しないこと^[6]、及び梁の曲げ耐力を考慮すると、単純支持構造の BSS に

関する脆性的崩壊回避の条件式 3.b 式を得ることができる。

• 単純支持の張弦梁構造の条件式

$$\frac{\text{ケーブル降伏軸力}_s N_{cy}}{\text{梁耐力}_b N_{cr}} < 1.0 \quad (3. a)$$

$$\frac{sN_{cy}}{bN_{cr}} + \frac{4 \cdot A_f + A_w}{2 \cdot A} \cdot \frac{M}{bM_{cr}} < 1.0 \quad (3. b)$$

記号

- bN_{cr} : 梁の曲げ座屈耐力
- sN_{cy} : スtringの降伏軸力
- A_w : ウェブの断面積
- A_f : 片側フランジの断面積
- A : 全断面積 ($A = A_w + 2 \cdot A_f$)
- bM_{cr} : 梁の横座屈耐力
- M : スtringが第一降伏点に達した応力状態での梁のモーメントのうち最大モーメントとする.

5. 条件式の検証

κ の値をストリングが第一降伏点に達した応力状態での梁のモーメントより正確に求めた算定例(条件式)と、 $\kappa = -1$ (安全側)とした算定例(略算条件式)のどちらの例も急激な耐力低下が発生したモデル A では 1.0 以上と妥当な結果となった。

• κ の値を線形解析結果より求めた例(条件式)

$$(A) \quad \frac{606.6}{945} + \frac{4 \cdot 2400 + 2808}{2 \cdot 7105} \cdot \frac{1.15 \times 10^8}{1.89 \times 10^8} = 1.17 > 1.0$$

$$(B) \quad \frac{606.6}{1581} + \frac{4 \cdot 3500 + 2808}{2 \cdot 9953} \cdot \frac{1.80 \times 10^8}{3.24 \times 10^8} = 0.85 < 1.0$$

$$(C) \quad \frac{606.6}{2332} + \frac{4 \cdot 4800 + 3580}{2 \cdot 13330} \cdot \frac{3.12 \times 10^8}{5.03 \times 10^8} = 0.79 < 1.0$$

• $\kappa = -1$ (安全側)として算出した例(略算条件式)

$$(A) \quad \frac{606.6}{945} + \frac{4 \cdot 2400 + 2808}{2 \cdot 7105} \cdot \frac{1.15 \times 10^8}{1.51 \times 10^8} = 1.30 > 1.0$$

$$(B) \quad \frac{606.6}{1581} + \frac{4 \cdot 3500 + 2808}{2 \cdot 9953} \cdot \frac{1.80 \times 10^8}{2.67 \times 10^8} = 0.95 < 1.0$$

$$(C) \quad \frac{606.6}{2332} + \frac{4 \cdot 4800 + 3580}{2 \cdot 13330} \cdot \frac{3.12 \times 10^8}{4.36 \times 10^8} = 0.86 < 1.0$$

6. まとめ

本研究では BSS の梁とストリングの部材耐力関係に着目して脆性的崩壊を回避する条件式を提案した。今後は、実験を通して確認を行う予定である。

【参考文献】

- [1] 亀山涼季ほか：雪荷重に対する張弦梁構造の弾塑性挙動に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp897-898, 2017 年 8 月
- [2] ISHINABE, Y. et al. Elastic-plastic behavior of long-span steel structures for snow load, IAASS 2016 TOKYO, 26-30 September, 2016, Tokyo, Japan
- [3] 斎藤公男ほか：張弦梁構造の弾塑性挙動に関する基礎的研究 - 組立式鋼管トラス梁を用いた載荷実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp1145-1146, 1985 年 10 月
- [4] 斎藤公男ほか：張弦梁構造の耐力及び弾塑性挙動に関する研究その 1，その 2，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp287-290, 1986 年 8 月
- [5] 日本建築学会：鋼構造塑性設計指針，日本建築学会，2017 年
- [6] 中島肇ほか：アーチ型張弦梁構造の座屈性状に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 76 巻，第 659 号，pp89-96, 平成 23 年