

長期的な荷重継続を受けた木材のクリープ変形に関する一考察：実架構の現況調査と常時微動測定による剛性評価

相生, 陽平
九州大学工学部建築学科

佐藤, 利昭
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門：准教授

<https://doi.org/10.15017/1931491>

出版情報：都市・建築学研究. 33, pp.47-52, 2018-01-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン：
権利関係：

長期的な荷重継続を受けた木材のクリープ変形に関する一考察 実架構の現況調査と常時微動測定による剛性評価

Consideration on Creep Deformation of Timber under Long-term Loading Structural Survey on Existing Frame and Evaluation of Stiffness by Microtremor Measurement

相生陽平*, 佐藤利昭**

Yohei AIOI and Toshiaki SATO

This paper describes the results of structural survey and analysis of wooden truss in building which is constructed nearly 100 years ago. Unlike experimental research, the initial condition that is elastic stiffness, state of joint cannot be confirmed in the survey targeting actual framework. We tried to evaluate the stiffness of the frame by identifying eigenvalues and vibration mode based on the results of microtremor measurements. After that, we calculated the deflection of beam in the truss from the evaluated stiffness and structure of the frame, and considered about the difference from actual deformation.

Keywords : Existing Structure, Creep, Wooden Truss, Visco-Elasticity

実構築物, クリープ, 木造トラス, 粘弾性

1. はじめに

構築物には、日常使用上の支障がない部材が選定され、長期荷重に対する構造計算の検定項目の1つとなっている。木質構造では、この検定に際し50～200年程度を再現期間としたクリープ変形が考慮され、弾性計算の2倍のたわみを見込むことが一般的である。しかし、この計算の根拠は、まだ実験環境が十分に整備されていない半世紀以上前の木材の曲げ実験に因るもので¹⁾、クリープ変形に代表される木材の粘弾性には、未解明な部分の方が多く、今後も継続的な検討が望まれる。

本研究は、これら木質構造の横架材のクリープ変形に着目したもので、1921年に竣工した九州大学工学部船舶海洋工学実験室の木造小屋組に関する調査・検討の結果を報告するものである。横架材のクリープ変形に対する実験的評価には時間を要することから、実架構を対象とした検討が殆どないため、約100年間の荷重継続を経た結果である本架構の現況を記録することは、有益であると考えている。クリープ変形に関する我が国の代表的な研究としては、1935年に実施された南のヒノキ材の長時間曲げ試験²⁾、竹山らの長期強度に関する検討結果³⁾などが挙げられ、曲げ許容応力度内でもクリープ変

形が増大すること²⁾や、所謂比例限度の1/3程度の応力をクリープ限度と見做すことが可能である³⁾と主張されている。木材を粘弾性材料と捉えれば、そもそも比例限度という概念に矛盾があるなど、現在の知見と照らし合わせれば問題点も残るが、これらの検討結果は現在の構造計算に大きく影響している。一方、これらを含む単一部材に関する先行研究^{例えば 4), 5)}でも、実験期間は数ヶ月から長くても10年以内であり、その結果を回帰式等に当てはめ、外挿することで将来を予想している点で、十分な検証ができていないわけではない。

以上を背景に、本報では実架構の現況調査を基に横架材のたわみを把握すると共に、建物の仕様および架構の構成から当該変形を試算し、それらの相違点を部材剛性に着目して考察した。実験とは異なり、実架構を対象とした調査では、初期条件や部材剛性等が未知であるため、ここでは常時微動測定を併用する方法を併せて検討した。具体的には、接合部の固定度や部材の材料特性等が未知であることを補完する方法として、微動測定の結果を基に固有値および振動モードを同定し、架構の剛性評価を試みた。ここで述べる方法は、実架構を対象とした調査・研究には不可欠なものと考えられ、ここで提示する方法を今後も適用することで、重要文化財に代表される歴史的建造物の補強設計等にも必要な情報が取り出せる可能性を継続的に検討することを考えている。

* 工学部建築学科

** 都市・建築学部門

2. 対象建物の現況調査と常時微動測定

2.1 対象建物の概要

本研究で対象とする建物は、九州大学工学部船舶海洋工学実験室の小屋組である。当該架構は木材で構成されたトラス架構で、1 間毎に約 9 m スパンの瓦屋根を支持している。概要として図 1 に内観写真を示す。



図 1 九州大学工学部船舶海洋工学実験室の内観

図 1 に示すように、本架構はキングポストトラスで、1921 年（大正 10 年）の竣工当時の記録と照らし合わせても、大きな架構の変更はないと言える。小屋梁を釣束および釣りボルトで支える構造で、ボルトと接合部以外はすべて木材であるが、使用されている木材の樹種等は不明で、当時の記録にも残されておらず、材料特性等も把握できていない。当該架構は、煉瓦造の壁の上に土台を介して設置されているが、接合部の固定度は外観調査では判別できない。図 2 に架構断面に各部の仕様を加筆して示す。なお、同図には、以降で用いる座標軸もあわせて示してある。

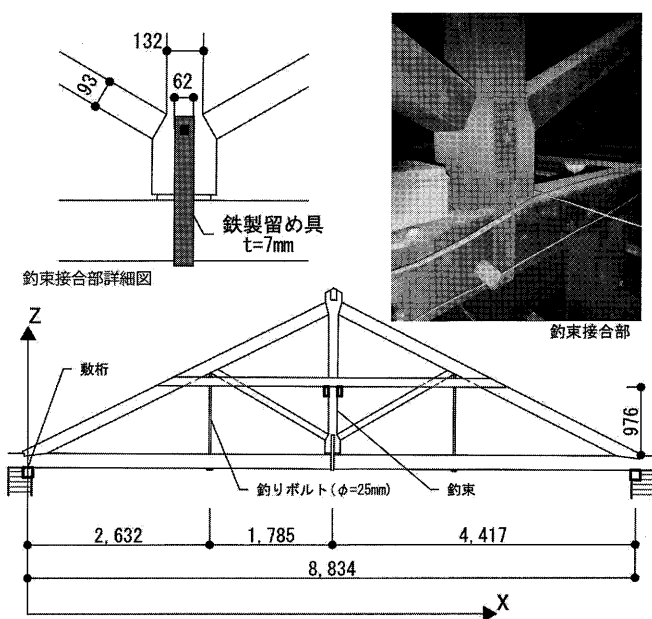


図 2 対象架構の断面と各部の仕様

2.2 現況調査による部材たわみの把握

長期的な荷重継続を受けた横架材の現況調査についてまとめる。調査は、主に後述する常時微動測定を実施した横架材を対象とした。まず、対象とする横架材を含む小屋組の構成部材を実測し、その後、横架材の鉛直方向の変形をレーザー距離計により調べた。変形状態を把握する際には、実験室の土間スラブの凹凸による影響を排除するため、水準器により水平基準高さを統一し、横架材下端との距離を測ることとした。また計測時にはあわせてレーザー照射位置の部材断面を実測した。これらの計測結果を表 1 にまとめる。

表 1 実測調査の結果

計測 No.	1	2	3
計測位置 x [mm]	2532	4317	6102
下端高さ [mm]	4075.0	4074.5	4072.0
部材断面 unit : mm	138 200	136 205	137 205

表 1 の結果において、部材断面の差異を考慮した上で断面中央、すなわち線材としての変形量を求めると、対象とする部材は鉛直下向きではなく、僅かではあるが鉛直上向きに変形していることが確認された。

2.3 常時微動測定

対象部材の曲げを評価する手段として、本報で実施した常時微動測定についてまとめる。測定の概要は図 3 に示す通りで、鉛直 1 成分、水平 2 成分の加速度を横架材上で 5 点、土間コンクリート上で 1 点で記録した。サンプリング周波数は 100 Hz で、30 分の時刻歴データを記録した。計測中には、飛行機や鉄道の影響も考えられるが、それ以外には外的要因はなかった。

本測定の結果として、計測時間全体の各計測器の鉛直方向のフーリエスペクトルと、土間コンクリートに対する横架材上の記録の伝達関数を、それぞれ図 4, 5 に示す。また、対象架構を支持する煉瓦壁の振動特性として、壁付近の記録（振動計①・⑥）に対する横架材中央の記録（振動計③）の伝達関数を図 6 として示す。ここで各図に示した結果は、移動平均に因って平滑化したものである。図 4 の結果より、横架材に設置したすべての計測器で、8 Hz ~ 15 Hz に増幅が認められることが分かる。図 5 の伝達関数では、4 ~ 6 Hz にも増幅が認められるが、この結果には煉瓦壁の特性も含まれる点に注意が必要で、図 6 の結果を勘案すると、横架材の上下応答の主たる成分は 8 Hz 以降と推察される⁶⁾。

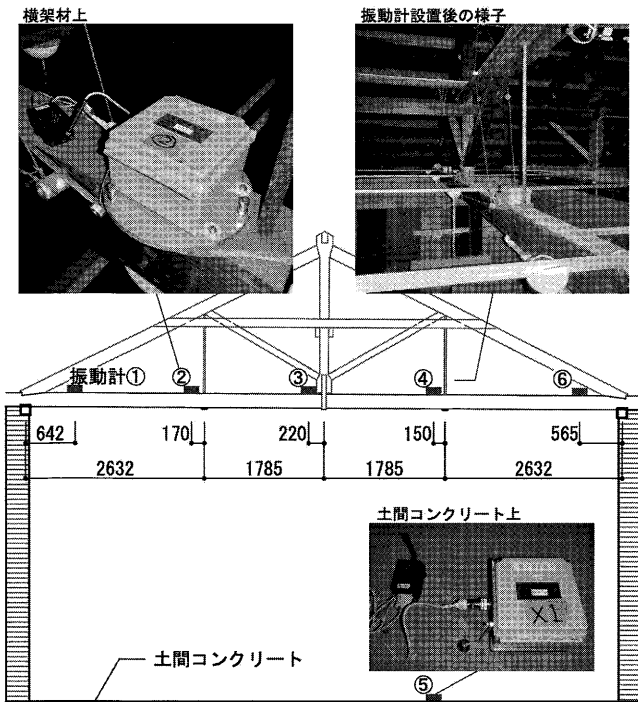


図 3 常時微動測定の設定概要

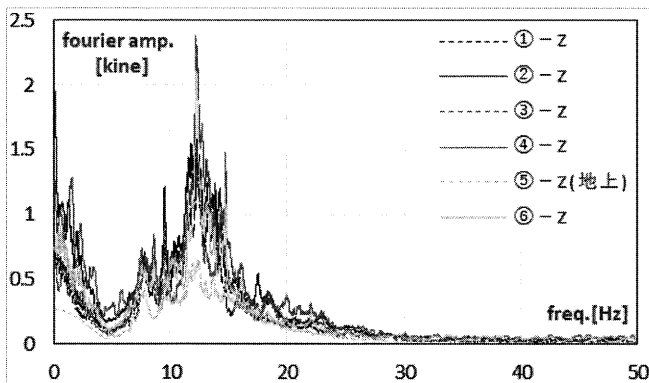


図 4 鉛直方向のフーリエスペクトル

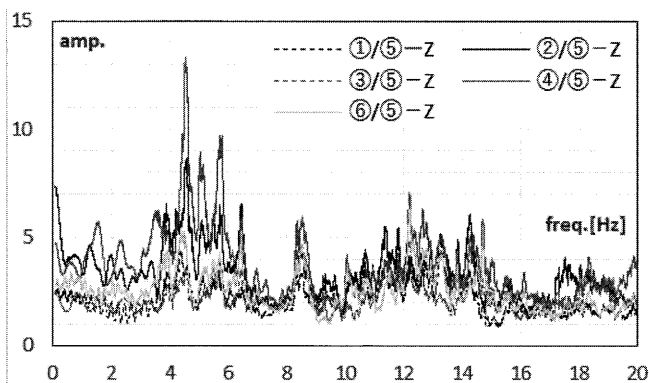


図 5 土間に対する横架材の鉛直方向の伝達関数

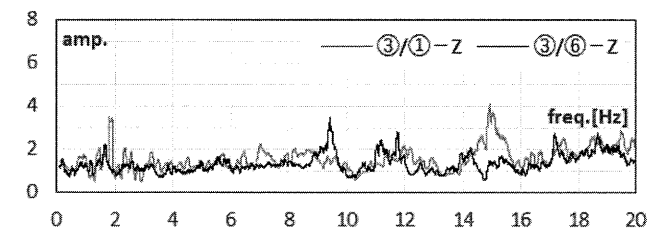


図 6 煉瓦壁に対する横架材の鉛直方向の伝達関数

3. システム同定による部材剛性の評価

3.1 システム同定の概要と同定結果

本研究で採用したシステム同定手法は、部分空間法である。この方法の特徴は、多入力多出力系のシステム同定を比較的安定して実行できる点で、近年、建築分野でも応用されている。また、本来は不確実性原理から短い時間間隔における振動特性を評価することが困難であるが、既往研究において当該手法を用いることで、木質構造の非線形性を一定の精度で評価できることを検討している⁸⁾。本報では、各計測点における鉛直方向（Z方向）のみに着目し、1入力5出力系として計算した結果を示すことにする。計算方法の詳細は文献に譲ることとし、概略のみ述べると、本手法は次の状態空間表現に基づくものとなる。

$$\mathbf{x}(N+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(N) + \mathbf{B}\mathbf{u}(N) + \mathbf{v}(N) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(N) = \mathbf{C}\mathbf{x}(N) + \mathbf{D}\mathbf{u}(N) + \mathbf{w}(N) \quad (2)$$

式(1), (2)で N : ステップ数, \mathbf{x} : 状態ベクトル, \mathbf{u} : 入力ベクトル, \mathbf{y} : 出力ベクトル, \mathbf{v} : システムノイズ, \mathbf{w} : 観測ノイズを意味し、これらが $\mathbf{A} \sim \mathbf{D}$ の係数行列によって結ばれることを表している。すなわち、状態という未知量の概念を基準に入出力関係を考えるもので、係数行列、正確にはそれらの相対関係を線形代数の知識を基に決定することで、固有値 λ_j (j : システム次数) を得ることができる。ここで得られる固有値は複素数であるため、最終的な計算結果として固有円振動数 ω_j と減衰定数 h_j が次式より評価される。

$$\omega_j = \frac{|\ln \lambda_j|}{\Delta t} \quad (3)$$

$$h_j = -\frac{\ln |\lambda_j|}{|\ln \lambda_j|} \quad (4)$$

この他、モードマトリクスも得られるが、以降に示す結果では参考程度に用いることにする。

以上の手法による具体的な計算手順は、まず得られた30 minの加速度記録を10 sec毎に分割し、180個のデータセットを用意する。式(1), (2)にもある通り、本手法では一定のノイズは許容されるが、外的要因によって記録に明らかな異常が認められる区間を排除し、ここでは結果が良好に求められるであろう90個のデータセット、時間にして合計15 min分を抽出した。その後、各区間の6 ch × 10 sec × 100 Hz = 6000個のデジタルデータにより入力用のブロックハンケル行列を作成し、システム同定を順次実行した。得られた同定結果として、固有振動数と減衰定数を図7, 8にまとめて示す。

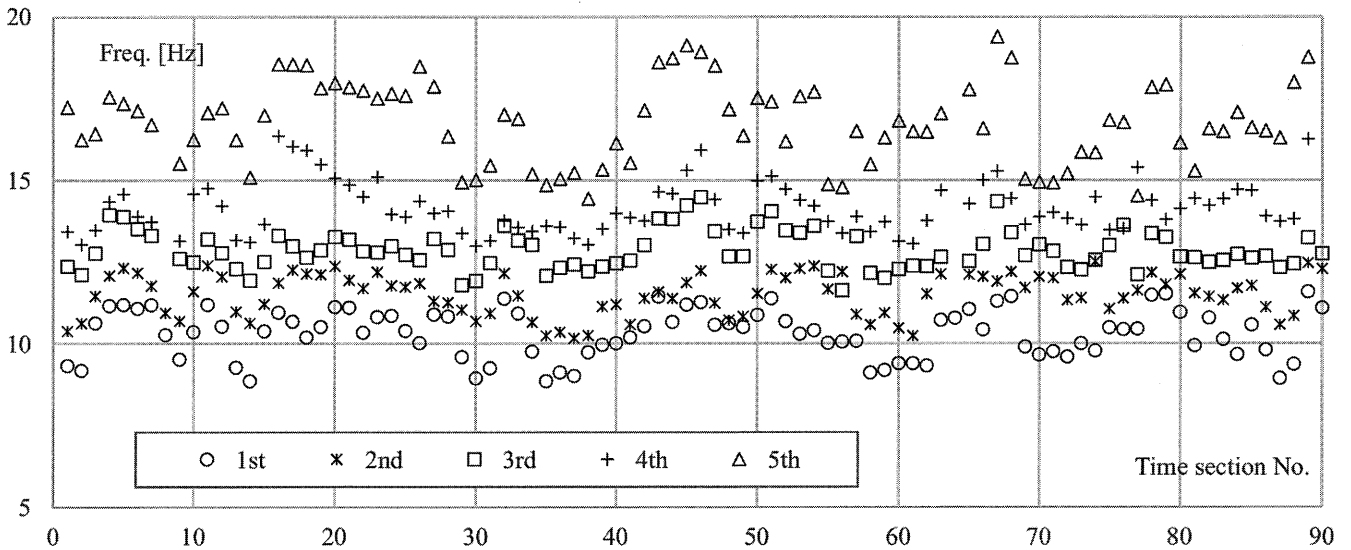


図 7 固有振動数の同定結果（1～5次）

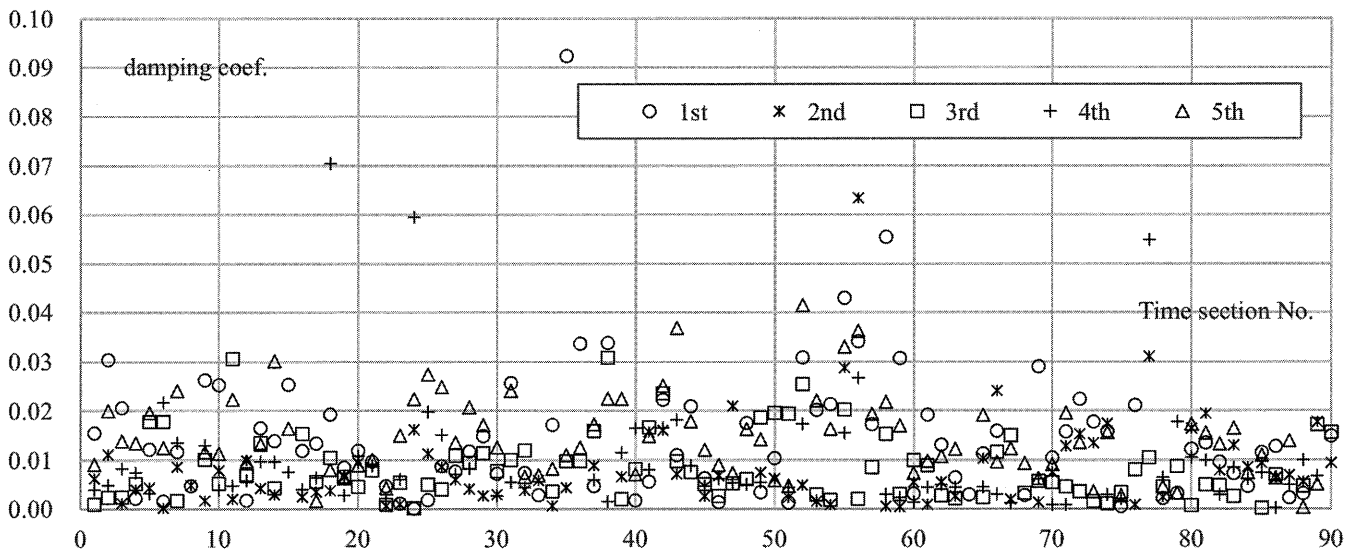


図 8 減衰定数の同定結果（1～5次）

図 7, 8 には 1～5 次 の固有値が示してある。同図の結果より、データセット毎に相応の差異が認められることが分かる。この要因には、各時間区間における含まれる材料の歪み依存性の影響等も考えられるが、ここではこれらの同定結果を概観して、本研究の目的である剛性評価を進める方針とした。ここで全データセットの同定結果を平均して各次の固有振動数を評価すると、1次は 10.3 Hz, 2次以降がそれぞれ 11.5 Hz, 12.8 Hz, 14.2 Hz, 16.8 Hz となる。固有振動数が理論解より近接しているため、同一の振動モードがデータセット毎に異なる次数で評価されている可能性が高いが、ここでは上記の 1 次固有振動数を基に、以降の検討を進める。減衰定数に関しては、平均的に 1% 程度と小さいが、場合によって 5% を超えるなど、不安定な結果が得られた。

3.2 部材の曲げ剛性の推定

単純支持および両端固定の単一横架材における固有振動数は、それぞれ近似的に次式により評価される。

$$f_a = 0.785 \cdot \frac{h}{l^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho}} \quad (5)$$

$$f_b = 1.780 \cdot \frac{h}{l^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho}} \quad (6)$$

式 (5), (6) で、 f_a : 単純支持時の 1 次固有振動数、 f_b : 両端固定時の 1 次固有振動数、 h : 梁せい、 l : スパン長さ、 E : 横架材のヤング率、 ρ : 密度を意味する。本報で対象とする架構は、部材端部の境界条件が不明なため、単純支持と固定の間を仮定し、ヤング率を推定する。

式 (5), (6) を E について解き, 組み合わせると部材のヤング率は以下の範囲に整理される.

$$3\rho\left(\frac{f}{1.78h}l^2\right)^2 \leq E \leq 3\rho\left(\frac{f}{0.785h}l^2\right)^2 \quad (7)$$

式 (7) の関係を基に, 当該部材のヤング率を求めると, ヤング率の範囲は $5.81 \sim 29.9 \text{ kN/mm}^2$ と推定されることになる. ここで求めた範囲は, 境界条件を設定できていないために範囲が広すぎるが, 木材の繊維方向のヤング率としては妥当な結果で得られていると判断される. 例えば一般的な木材のヤング率として, 機械等級区分でいう $E 70$ 相当を想定すれば, そのヤング率の基準値は 6.9 kN/mm^2 である⁹⁾. すなわち, 部材のヤング率と境界条件の双方が不明なため, 推測の域をでないが, 部材端部の境界条件は, 完全な固定条件とは言えないまでも, 一定以上のモーメント抵抗が期待される接合部であることが, 本検討の結果より推察される.

4. 構造計算によるクリープ変形の推定

4.1 検討概要

以降では, 上記で推定した部材の特性を基に横架材の変形を試算し, 現況調査との対応を調べることにする. 前節で求めたヤング率は, 境界条件が不明なため範囲が広がったが, ここでは推定の範囲内にあり, かつ一般的な $E70$ 相当の部材であると仮定して計算を進める.

ここでトラス架構の変形の計算手順は, 2015年に改訂された JIS A 3301「木造校舎の構造設計標準」の技術資料に則って行うことにする¹⁰⁾. JIS A 3301は, 1944年公示の臨時日本標準規格第435号「国民学校建物」に端を発し, 1947年の日本建築規格「小学校建物(木造) JES 建築1301」などを経て1956年にJISに統合されたものである. 技術資料の中では, 本報で対象とするキングポストトラスの木造小屋組の扱いが紹介されている.

4.2 部材変形の推定

図9に示す端部を単純支持としたトラスを仮定し, たわみを求める. 図1, 2に示したトラス架構では, 高さ方向の中央付近に2種類の水平部材が現れているが, これらはトラス部材を挟む形で取り付けられた鉛直荷重を支持しない部材である.

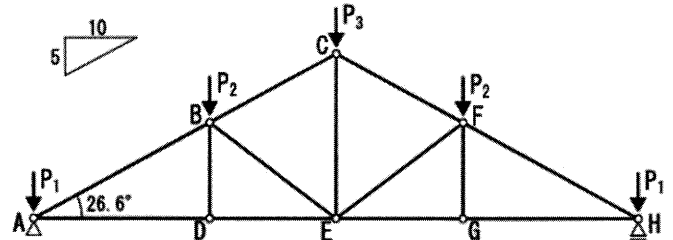


図9 トラスの力学モデルと荷重条件

屋根勾配は当時の設計図書より5寸勾配, 合掌尻の部材角を 26.6° とする. 長期荷重は屋根面の固定荷重のみとし, 各節点から斜材中央までの重量の合計を, 当該節点に作用する集中荷重とした. 軒の出は 0.4 m で, それに相当する荷重は, 図9の点A, Hに作用するものとした. 屋根重量は, 葺き土有りの瓦屋根の公称値を参照し, 水平投影面積あたり 1.34 kN/m^2 とした⁹⁾.

以上の条件から, トラス部材の各節点をピン接合として節点法により軸力を求め, さらに仮想仕事法によりたわみ量を算定した. スパン中央点Eに単位荷重 $P = 1$ を加えた時の各部材の仮想荷重 N_0 およびたわみの計算に必要な諸数値を表2にまとめる. ここで, 軸応力は, 引張を正としてある. 表2の結果より, トラスの長期荷重時のたわみ量 $\delta_T = 1.9 \text{ mm}$ となる.

ここまでは, 対象横架材を図9で示したトラス架構の構成部材として, 屋根の固定荷重に対してこの部材に生じるたわみを求めた. 以降の計算では, トラス架構の

表2 部材変形の計算結果

部材	部材長L [m]	ヤング率E [N/mm ²]	断面積A [mm ²]	仮想荷重N ₀	部材応力N [kN]	(N ₀ ・N・L) / EA [mm]
AB	2.93	6900	24300	-1.141	-17.4	0.35
BC	1.99		24300	-1.141	-12.4	0.17
CF	1.99		24300	-1.141	-12.4	0.17
FH	2.93		24300	-1.141	-17.4	0.35
BE	2.20		12276	0	-4.51	0
EF	2.20		12276	0	-4.51	0
BD	1.28		1963	0	0	0
FG	1.28		1963	0	0	0
AD	2.63		27000	1.026	15.6	0.23
DE	1.79		27000	1.026	15.6	0.15
DG	1.79		27000	1.026	15.6	0.15
GH	2.63		27000	1.026	15.6	0.23
CE	2.15		17424	1	6.45	0.12

特徴から、対象の横架材には自重のみが作用することを仮定する。また、上記と同様の境界条件である単純支持に加え、端部を固定とした検討も併せて行う。図 10 には、これらの条件を整理した力学モデルとして、等分布荷重 w が作用する条件を参考として示してある。



図 10 検討する横架材の力学モデル

等分布荷重 w を受ける横架材の初期たわみは、単純支持の場合を δ_p 、固定の場合を δ_f として次式で求められる。この計算には δ_T と同様のヤング率、寸法を用いる。

$$\delta_p = \frac{5wl^4}{384EI}, \delta_f = \frac{wl^4}{384EI} \quad (8), (9)$$

長期的なクリープ変形は、この自重によるたわみの増大と捉え、これに現行の設計基準にある変形増大係数 $C_{CP} = 2$ を乗じた結果を、クリープ変形を含む横架材のたわみと考える。以上をまとめ、対象横架材の最終的なたわみ量は、端部の境界条件を単純支持とした場合を δ_1 、固定とした場合を δ_2 として次式で評価する。

$$\delta_1 = \delta_T + C_{CP} \cdot \delta_p \text{ or } \delta_2 = \delta_T + C_{CP} \cdot \delta_f \quad (10)$$

計算結果を表 3 にまとめる。2.1 節で述べた通り、木材の樹種が不明であるため、ここではスギ、ヒノキ、アカマツの公称値を基に計算した¹¹⁾。計算結果より、計算条件から当然ではあるが、本架構では施工段階で横架材に 5～30 mm 程度のむくりがつけられていたことが推察される。これは 2.2 節で述べた実測結果において、長期間経過後でも僅かに上向きに凸の状態であったこととも整合する。すなわち、本報で対象とした横架材は、96 年間に及ぶクリープ変形より、むくりが大きく設定されていたと推定される。また、表 3 の支持条件によるたわみ量の差異に着目すると、剛性の推定と同様、一定以上のモーメント抵抗が期待される境界条件で、その結果、現在の変形量が抑えられた可能性も示唆される。

5. まとめ

本報では、約 100 年におよぶ長期荷重を受けた木造トラス架構の現況調査と常時微動測定を実施し、現況を分析した。得られた知見を以下にまとめる。

- ・ 現存する木造トラス架構の構成部材に対して、常時微動測定を実施し、固定条件等が未知である場合には問題が残るものの、システム同定によって部材のヤング率が推定されることを確認した。
- ・ 長期間荷重を受けた横架材のたわみを推定した結果、施工時にむくりがつけられ、現況の変形がその範囲内にあること、また横架材の支持条件がピンよりも固定に近いことが推察された。

謝辞

九州大学工学部船舶海洋工学実験室の現地調査にあたり、九州大学神野教授、重藤助教、ならびに技術職員の窪寺氏、武田氏にはご助力頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Forest Product Laboratory : Relation of Strength of Wood to Duration of Load, Madison 5, 1951. 12
- 2) 南義夫:木材の長時間曲げ試験, 東京帝国大学航空研究所彙報, 第 136 号, pp.1090-1102, 1935. 12
- 3) 竹山謙三郎, 久田俊彦, 竹之内清次:木構造の長期強度について, 日本建築学会論文集, 第 39 号, pp.18-27, 1949. 11
- 4) 杉山英男:木材の曲げ強度と剛性に及ぼす荷重時間の影響, 日本建築学会論文集, 第 52 号, pp.85-94, 1956. 3
- 5) 木村衛, 楠寿博, 篤海四郎:実大米松集成材の曲げクリープ性状, 日本建築学会構造系論文集, 第 561 号, pp.169-176, 2002. 11
- 6) 多幾山法子, 田井利幸, 林康裕:歴史的煉瓦造構造物における無補強壁の振動特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 IV, pp.931-936, 2011. 8
- 7) 肥田剛典, 永野正行:部分空間法に基づくシステム同定による建物の固有振動数と減衰定数の推定精度, 日本建築学会構造系論文集, 第 701 号, pp.923-932, 2014. 7
- 8) Hida, T., Sato, T. and Nagano, M : Study on structural health monitoring method by recursive subspace identification based on shaking table tests of wooden structure, 16th WCEE, No. 913, Santiago, Chile, 2017. 1
- 9) 日本建築学会:木質構造設計基準・同解説, 2006
- 10) 文部科学省:JIS A 3301「木造校舎の構造設計標準」を用いた木造校舎に関する技術資料, 2015
- 11) 森林総合研究所:木材工業ハンドブック 改訂 4 版, 丸善出版, 2013. 8

表 3 クリープを考慮した横架材のたわみ量の推定値

樹種	密度 [g/cm ³]	分布荷重 w [N/mm]	δ_p [mm]	δ_f [mm]	δ_1 [mm]	δ_2 [mm]
スギ	0.34	0.094	10.9	2.2	23.7	6.3
ヒノキ	0.43	0.119	13.8	2.8	29.5	7.4
アカマツ	0.47	0.130	15.1	3.0	32.1	7.9

(受理：平成29年11月6日)