三次元変位測定システムによる 木質構造物の大変形測定

MEASUREMENT OF LARGE DEFORMATION FOR TIMBER STRUCTURE WITH THREE- DIMENSIONAL MEASURING SYSTEM

青木謙治 — * 1 軽部正彦 — * 2
新藤健太 — * 3 林 知行 — * 4
藤田和彦 — * 5 山本 健 — * 5

Kenji AOKI — * 1 Masahiko KARUBE — * 2
Kenta SHINDO — * 3 Tomoyuki HAYASHI — * 4
Kazuhiko FUJITA — * 5 Ken YAMAMOTO — * 5

キーワード：
三次元測定, 大変形測定, 載荷破壊試験, 木橋

Keywords:
Three-dimensional measuring system, Measurement of large deformation, Destructive loading, Timber bridge

The experiment of timber structures often extends to the large deformation area. However, an appropriate measuring method of large deformation is not in existence. We carried out the static loading test to the rebuilt timber truss bridge of the length of 36m. In this test, a three-dimensional measuring system that used wired displacement transducers was developed. The two kinds of vertical displacements obtained from transducers and a surveying instrument by numerical calculation showed almost good agreement.

1. はじめに

木質構造物の静的加力試験等を行う場合、RC造やS造等の他構造物に比べて大変形領域にまで及ぶ測定を行う場合が多い。例えば、木造の耐力壁の水平せん断試験を実施する場合、標準的な試験方法¹⁾に定められた終局時の試験体頂部変形量は約180mm程度であり、真構造等の伝統的な軸組構法耐力壁の場合は変形の進行に伴って耐力が漸増するため、500~700mmという加力装置の限界まで加力する場合もある^{2,3)}。そのような試験を行う際には大変形に追従可能な測定装置が必要となるが、現状はワイヤー式の変位計を用いるか、ストローク式の変位計の盛り換え等を行っているため、変形の進行に伴う試験体高さの変化に追従できず、正確な変形量の測定ができていない可能性がある。また実大建物の振動台実験でも、層間変形量の測定にはワイヤー式変位計が用いられる事が多いが⁴⁾、一方向の変形のみを測定するような設置方法であるため、三次元入力等の場合には層間変形を正しく測定できているか疑問が残る。

一方、近年の振動台実験などでは、画像計測技術を用いた大変形測定が行われるようになり、建物の倒壊挙動まで測定できる手法として活用されている^{5,6)}。そこで筆者らも、本稿で報告する木造トラス橋の載荷破壊試験実施に伴い、同様の画像計測の事前検討を行ったが、晴天の屋外において長時間にわたり安定して測定することは困難であり、採用を断念した経緯がある。

このような背景から、木造トラス橋の三次元変形(特に鉛直方向の変形)を正確に測定する方法を新たに検討する必要性が生じ、ワイヤー式変位計を三角錐状に設置して数値計算で三方向成分を求める方法を検討した。その結果、本測定方法によって木造トラス橋下弦材の三次元的な動きを把握することができ、同時に行った測量機器を用いた光波測定による測量結果とも概ね良好な一致を見せた。

本手法は、特殊な装置を用いることなく、通常の構造実験で用いるワイヤー式変位計とデータロガーがあれば測定が可能であり、木

質構造以外の大変形を伴う構造実験全般にも応用することができるため、試験概要と共にその測定技術を報告する。

2. 木造トラス橋の載荷破壊試験

2.1 試験の全体概要

今回の試験対象となった木造トラス橋は、1990年5月に広島県立山野峡自然公園内の歩道橋として架設された径間36mの下路式木造単純トラス橋「かっぱ橋」である。部材は、集成材ベイマツ1級(当時のJAS)に天然系防腐塗料を塗布したもので、断面寸法は上下弦材が幅220×厚さ262mm、斜材が幅220×厚さ170mm、接合部はコの字型金物を用いた鋼板添え板二面せん断ボルト接合である。

この木造トラス橋は、2003年12月に13年という短い供用期間を終えて解体撤去された⁷⁾。筆者らは、解体に際して全ての部材と接合部品を回収して屋内保管していたが、2007年3月に架設当初からの部材と接合部品だけを使って木橋を再組立した⁸⁾。それ以降、各種非破壊調査を元に部材劣化の内容および評価方法について検討してきたが、2008年6月に、残存耐力を実際に検証する目的で載荷実験を実施し、破壊に至らしめた⁹⁾(写真1)。

写真1 載荷試験により破壊した木造トラス橋

^{*1} 独森林総合研究所 構造利用研究領域 主任研究員・博士(農学)
(〒305-8687 つくば市松の里1)

^{*2} 独森林総合研究所 構造利用研究領域 チーム長・博士(工学)

^{*3} 独森林総合研究所 複合材料研究領域 主任研究員・博士(工学)

^{*4} 独森林総合研究所 構造利用研究領域長・博士(農学)

^{*5} 広島県立総合技術研究所 林業技術センター

^{*1} Senior Researcher, Dept. of Wood Engineering, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), Dr. Agr.

^{*2} Team Leader, Dept. of Wood Engineering, FFPRI, Dr. Eng.

^{*3} Senior Researcher, Dept. of Wood-Based Material, FFPRI, Dr. Eng.

^{*4} Director, Dept. of Wood Engineering, FFPRI, Dr. Agr.

^{*5} Forestry Research Center, Hiroshima Prefectural Technology Research Institute

2.2 載荷・測定方法

載荷破壊試験は、土のうを順次載荷することによる一方向単調載荷とした。移動式クレーンを使い、木橋の上弦材間にある水平ブレースをかわしながら、重さ約 350kg の土のうを図 1 に示す橋長中央 1/2 の範囲に、橋長および幅員方向に対してできるだけ対称になるよう床版上に積載する方法を採用した。木橋にとって最も厳しい載荷条件は、橋中央に人や貨物等が集中した場合を想定した中央集中載荷と思われるが、作業・測定者の安全を確保しつつ、低重心かつ効率的に載荷することを目的として、橋長中央 1/2 部分に土のうを積載する方法を採用するに至った⁹⁾。

載荷荷重は、木橋と橋台との間に設置した 4 台のロードセルで支点反力を測定することによって求めた。測定については、木橋全体の変形や接合部の相対変位を測定するために計 154 台の変位計を設置し、各部材にはひずみゲージ（計 172 枚）を貼り付け、2 系統のデータロガーにて土のうの載荷速度等に関係なくインターバル測定を行った。本報告では木橋下弦材の三方向変位測定と、それを補完する目的で行った光波測定の 2 つに絞って詳細に報告するので、その他の測定点等については既報告^{9),10)}を参照されたい。

図 1 には節点番号と方向の定義を示した。

図 1 節点番号と方向の定義

2.3 ワイヤ式変位計による三次元測定

本研究の対象である木造トラス橋の場合、木橋全体の変形性状を把握することは最も基本的な測定事項であり、特に下弦材の鉛直方向変形を正確に測定することが重要となる。しかしながら、土のう載荷に伴う変形の進行は、必ずしも鉛直下方のみとは限らないため、三次元的な動きを測定する必要があった。そこで筆者らは、写真 2 に示すような測定装置を作成した。

本装置は、ワイヤ式変位計を正三角形形状に配置した定規を作成し、定規中心直上に測定対象点に来るように設置するものである。図 2 に示す下弦材の三次元変位測定箇所 10 点の直下に杭を打ち込んでその頂部を水平調整し、その上に予め変位計を中心から等距離（中心からの距離を 1m に設定）に固定した定規を設置した。変位計は定規平面に対して 60 度の角度で設置してあり、概ね、稜線：中心からの距離：高さの比が $2:1:\sqrt{3}$ となっている。変位計から測定対象点までのワイヤ長さは、測定対象点から定規中心までの鉛直高さを測ることによって計算で求めることが可能であり、試験開始後はワイヤ式変位計の相対変形量を記録することによって、測定点の三次元的な動きを XYZ 方向成分に分けて算出することが可能となる。ワイヤ式変位計の測定ストロークは、想定される変形量に対応する長さがあれば十分であることから、斜辺長さの不足分は直径 1mm のワイヤを延長した。測定点までの距離が長い場合には、ワイヤの重量等によるたわみや風による影響も無視できなくなるが、今回の実験に関してはそれらの影響は認められなかった。

なお、木橋の支点部分 4 箇所は橋台上にあり、変形量も小さいことが予想されたため、XYZ 方向からストローク式変位計を直接下弦材端部に当てることで変位を測定することとした。

写真 2 三次元測定システム（白線は写真上で追加）

図 2 下弦材の変位測定箇所（平面図）

2.4 トータルステーションを用いた光波測定

変位計を用いた三次元測定を補完する目的で、測量用機器であるトータルステーションを用いた光波測定を行った。本システムは、測定したい場所に予めプリズムターゲット（又はシールターゲット）を設置し、初期位置を手動で測定した後は自動的に機械が巡回測定する装置であり、鉄塔などの大型構造物の載荷実験などで測定実績がある。木造トラス橋の載荷破壊試験がやり直しのきかない実験であること、変位計等による測定とは全く別系統の測定も平行して行うことで不測の事態にも備えたいことなどから、変位計による測定を補完する測定として採用した。

今回は、自動追尾型トータルステーション(TCA1100S)を使用し、図 3 に示すように、上弦材の上部 10 点にプリズムターゲットを、下弦材の下流面 7 点にシールターゲットを取り付け、木橋下流側に 50m 程度離れた斜面上部から 3 次元座標測定を行った（写真 3）。測定時間は 1 点につき 3～5 秒とデータロガーに比べると時間を要し、測定誤差は距離 50m で約 0.75mm、最小表示精度は 1mm とのことであった。得られた座標データをもとに初期値からの相対移動値を求めることによって、各測定点の変形量を求めた。

図 3 測量用ターゲット設置位置

写真3 光波測定の様子（初期位置測定時）

2.5 試験結果の概略

土のう26袋（94.4kN）を載荷した時点で、橋長中央部付近の上流側下弦材が破断して傾いた（写真4の円部分）。この一次破断における破断箇所は、解体撤去時の非破壊調査より部材の劣化が指摘されており、試験前に破断箇所として予見していた箇所の一つであった。その後は破断した上流側への載荷は土のうの落下や木橋の予期せぬ破断が予想されて危険なため、下流側に偏った載荷を続けた。53袋（189.7kN）を載荷した時点で下流側の上弦材がトラス格点間中央部分で圧縮破断し、最終破断に至った（写真5の円部分）。この部材に関しても、長期間の暴露により部材上面が溝状に腐朽しており、劣化の進行が指摘されていた箇所であった。

写真4 部材破断状況（一次破断）

写真5 部材破断状況（二次破断）

3. 三次元測定の計算処理方法

X,Y,Z空間において、図4のように三角錐の頂点4点の座標を $A(x_A, y_A, z_A)$ 、 $B(x_B, y_B, z_B)$ 、 $C(x_C, y_C, z_C)$ 、 $D(x_D, y_D, z_D)$ とし、辺AD、BD、CDの長さをそれぞれ L_1 、 L_2 、 L_3 とおくと、

$$\begin{aligned} L_1 &= \sqrt{(x_A - x_D)^2 + (y_A - y_D)^2 + (z_A - z_D)^2} \\ L_2 &= \sqrt{(x_B - x_D)^2 + (y_B - y_D)^2 + (z_B - z_D)^2} \\ L_3 &= \sqrt{(x_C - x_D)^2 + (y_C - y_D)^2 + (z_C - z_D)^2} \end{aligned} \quad \cdots(1)$$

と表せる。

さらに、計算の簡略化のため、三角形ABCを正三角形とし、 $Z=0$ のXY平面上に設置したとする。この時、A点の座標を $(0, -2\alpha, 0)$ とおくと、B,C点の座標はそれぞれ図5のように決まる。これを元に(1)式を書き直すと、

$$\begin{aligned} L_1 &= \sqrt{x_D^2 + (-2\alpha - y_D)^2 + z_D^2} \\ L_2 &= \sqrt{(-\sqrt{3}\alpha - x_D)^2 + (\alpha - y_D)^2 + z_D^2} \end{aligned} \quad \cdots(2)$$

$$L_3 = \sqrt{(\sqrt{3}\alpha - x_D)^2 + (\alpha - y_D)^2 + z_D^2}$$

となる。

(2)式を x_D 、 y_D 、 z_D について整理すると、

$$\begin{aligned} x_D &= \frac{\sqrt{3}L_2^2 - \sqrt{3}L_3^2}{12\alpha} \\ y_D &= \frac{-2L_1^2 + L_2^2 + L_3^2}{12\alpha} \\ z_D &= \frac{12\alpha^2(L_1^2 + L_2^2 + L_3^2 - 12\alpha^2) - L_1^4 - L_2^4 - L_3^4 + L_1^2L_2^2 + L_1^2L_3^2 + L_2^2L_3^2}{6\alpha} \end{aligned} \quad \cdots(3)$$

となり、三角錐頂部のXYZ座標を求めることができる。

図4 座標の定義

図5 XY平面上での座標の簡略化

4. 測定結果の比較

図6には、(3)式で求めた変位のうち、三次元測定の主目的であった鉛直方向の変位 z_D を示した。初期値は測定用定規から測定対象点までの高さとしており、実際には木橋のスパン中央が垂下していたことから、支持点近くは高く、中央部の節点13が最も低くなっている。載荷荷重が増えるにつれて徐々に変形が進み（高さが低くなり）、94.4kN載荷時の一次破断では、上流側下弦材の破断により上流側測定点は急激に変形が進行した。下流側下弦材は一次破断によって3倍程度に変形が増大したものの、そこで持ちこたえて二次破断まで

徐々に変形が進行していった。最終的には、二次破壊である載荷荷重 189.7kN の時点で、下流側上弦材の圧縮破壊により一気に木橋が落下し、変位計防護用集成材の上に着地した。

図 7 には、一次破壊、二次破壊の前後における下弦材の変形状（鉛直変位のみ）を示した。一次破壊で上流側が一気に変形が進行し、その形状を保ったまま二次破壊まで徐々に変形が進行していった様子が見てとれる。ワイヤー式変位計を用いた三次元測定から数値計算によって変位を求める本手法によって、大変形に及ぶ測定が正確に行えることが確認された。

図 6 下弦材測定点の鉛直変位

図 7 下弦材の変形状

図 8 には、変位計による三次元測定とトータルステーションによる光波測定の鉛直方向変位の比較を示した。下弦材のシールターゲットは下流側の下弦材側面のみしか貼っていないため、下流側のみの比較となっている。また、二次破壊直前の光波測定は、測定時間の短縮の目的から主要測定点のみの測定であったため、節点番号 9, 13, 17 の 3 点しか比較することができない。

両測定手法による変位は概ね良く一致しており、光波測定が木橋下弦材の変形を正確に捉えていることが明らかとなった。なお、一次破壊直後の誤差が若干大きい、これは測定に時間を要する光波測定と変位計による測定との測定時刻に差が生じ、一次破壊直後の変形の進行による変位増分が生じたためと考えられる。その他の測

定では両測定方法の誤差は概ね 10mm 程度以内で、変位に対する誤差の比率では 10%以下に収まっていた。

図 8 下流側下弦材の変位比較

5. まとめ

木質構造物の大変形測定に適用可能な、ワイヤー式変位計を三角錐状に配置することによる三次元変位測定システムを採用し、得られた結果から数値計算で三方向の変形成分を算出する方法を検討した。木造トラス橋の載荷破壊試験を通じてその信頼性を確認した結果、三次元変位測定システムは木造トラス橋の動きを正確に捉えており、大変形を伴う様々な構造実験に応用可能な測定方法であることが分かった。

謝辞

本研究は、独立行政法人森林総合研究所 運営費交付金プロジェクト「既存木橋の構造安全性を維持するための残存強度評価技術開発」によって実施した。研究の実施にあたり、広島県立総合技術研究所 林業技術センターをはじめ、多くの方々のご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 木造の耐力壁及びその倍率性能評価業務方法書, (財)日本住宅・木材技術センター, 2001
- 2) 山田真澄, 鈴木祥之, 後藤正美, 清水秀丸: 単位木造フレームを用いた動的・静的実験による木造軸組の耐震性能評価, 日本建築学会構造系論文集, 582, pp.95-102, 2004.8
- 3) 青木謙治, 杉本健一, 軽部正彦, 神谷文夫: 製作後 27 年程度経過した土塗り壁の水平せん断性能, 木材工業, 64(4), pp.172-175, 2009.4
- 4) 橋本敏男: 実大木造住宅の振動台実験の標準化について, Journal of Timber Engineering, 18(6), pp.175-179, 2005.11
- 5) 藤田聡, 古屋治, 豊嶋学, 三輪晋也, 腰原幹雄: 既存木造住宅の耐震性向上に関する総合的研究 その 8 実大振動台実験における画像計測方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.213-214, 2003.9
- 6) 古屋治, 藤田聡, 五十田博, 梶本敬大, 箕輪親宏: 震動台による既存木造住宅の耐震性能検証実験 その 14 画像計測法による三次元的動的応答計測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.393-394, 2006.9
- 7) 藤田和彦, 軽部正彦, 宮武 敦, 渡辺 浩: 13 年で架け替えられた木橋の経緯と履歴, 土木学会 第 3 回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, pp.127-132, 2004.7
- 8) 軽部正彦, 藤田和彦, 築山健一, 長尾博文, 宮武 敦: 13 年で架け替えられたトラス木橋の再組立とその変化, 土木学会 第 6 回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, pp.113-118, 2007.8
- 9) 軽部正彦, 林知行, 加藤英雄, 宮武敦, 新藤健太, 青木謙治, 藤田和彦: 13 年の供用履歴を持つ既存木橋の載荷破壊試験, 第 7 回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, pp.129-134, 2008.8
- 10) 軽部正彦, 青木謙治, 山本健 他: 再組立した既存木造トラス橋の載荷破壊試験 (その 1~その 6), 第 59 回日本木材学会大会研究発表要旨集 (CD-ROM), H15-1615b~H15-1645b 及び PH015~PH017, 2009.3

[2009 年 2 月 20 日原稿受理 2009 年 4 月 30 日採用決定]