既設木橋を用いた各種補修技術とその効果の実験的検証

Experimental verifications of some repair techniques for timber bridge

○宮武敦* 軽部正彦* 藤田和彦** 柳川靖夫*** 孕石剛志**** 渡辺浩*****
原田真樹* 井道裕史* 平松靖* 長尾博文*
MIYATAKE Atsushi, KARUBE Masahiko, FUJITA Kazuhiko,
YANAGAWA Yasuo, HARAMIISHI tsuyosi, WATANABE Hiroshi,
HARADA Masaki, IDO Hirofumi, HIRAMATSU Yasushi and NAGAO Hirofumi

* 森林総合研究所 (〒305-8687 茨城県つくば市松の里1)
** 広島県立総合技術研究所林業技術センター (〒728-0013 広島県三次市十日市東四丁目6-1)
*** 奈良県森林技術センター (〒635-0133 奈良県高市郡高取町吉備1)
**** 銘建工業株式会社 (〒719-3205 岡山県真庭市草加部1334-4)
***** 福岡大学 (〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈8-19-1)

ABSTRACT It is necessary to develop the technics that prevent or delay the progress of the deterioration and reinforces. The research to verify the effects of various repair technicses by using two truss bridges of 18m length was started with the research grant #200702 of Forest and Forest Products Research Institute. In this report, it reports the outline of the research plan, the repair technics adopted this time. In addition, It reports on the measurement result of the ultrasonic velocity and moisture content of the members for about six months after repairs.

Keywords : 補修、防水処置、含水率、超音波伝播速度、木トラス橋
repair, waterproof treatment, moisture content, ultrasonic velocity, wooden truss bridge

1. はじめに

1990年代に木橋が全国各地に架設されたが、その多くは架設後10年以上経過し、中には落橋に至ったものや供用を中止して架け替えられたものも出てきている。この様な中、既存木橋の現状を的確に判断する[1-4]と同時に、劣化の進行を防いだり遅らせたりするための補修技術、あるいはその状態に応じた補強を行なう技術を早急に開発する必要がある[5,6]。

森林総合研究所交付金プロジェクト（課題番号：200702）では、13年間供用された木造トラス橋の部材を再組立もしくは再編組立して橋長18mのトラス橋を2橋架設し、これらを用いた各種補修技術の効果を検証するための研究計画を策定してその一部を開始した[7]。本報告では、研究計画の概要、今回採用した補修技術の概要、施工の経過について報告する。また、架設・補修後の部材の超音波伝播時間、含水率、各部位の温湿度変化等について約6ヶ月間の経過を報告する。

2. 実験計画

2.1 補修関連用語の定義

補修・補強と言っても、対象物やその状況、あるいは関係者の立場などによって様々な捉え方をされる可能性がある。木橋の場合どの様に言葉を定義すべきか、まだ、十分なコンセンサスがあるとは言えない。ここでは、補修・補強について、「初期設計において想定した性能が確保されていないことを補い繕うこと」とし、さらにこの中を次の4つに細分化する。

1)「環境改善処置」→腐朽や錆びが生じることが予想される、もしくは極初期的な腐朽等劣化が生じているなどの理由により、雨水の遮断、通風確保などの構造・構法的な処置を行うこと
2)「美観改善」→主に見え掛り部分の印象を改善するための塗装等による処置を行うこと

3)「追加保存処理」→腐朽・蟻害あるいは錆が生じた部材・部品に、追加で防腐薬剤、防錆剤を塗布するなどの処理を行うこと
4)「補強」→腐朽や錆び、破損等によってダメージを受けた木部材、金物等の強度を補うために処置を行うこと
これらの内1)～3)を「補修」と呼ぶこととする。

2.2 補修に関する実験計画の概要

本研究で対象とする補修技術は環境改善処置を中心とし、(1) 部材カバーの設置および (2) 屋根の設置を行うことにした。また、旧かっぱ橋の構造上の弱点と指摘されてきた格点部の雨水対策についても検討することとした。

(1) 部材カバー

部材カバーは、後付も容易で大がかりな工事も必要ないことから環境改善技術として有力な技術の一つである。旧かっぱ橋でも、雨水の排水を目的として架設当時より上弦材にカバーが設置されていた。しかしながら、カバーのなかった下弦材と同様に上弦材にも腐朽が進行していることが第1径間、第2径間ともに確認されており、また、第1径間の載荷実験における最終破断は腐朽した上弦材の圧壊でもあった。ここでは、部材カバーがもたらす効果がどの様なものであるかを実橋で検証することを目的とする。

部材カバーは、旧かっぱ橋で採用されたものと同様に、接合部と接合部の間で露出する部材部分のみを覆う形式とした。部材カバーの効果を検証するための各種測定を行うため、脱着式とした。取り付ける部材は、上弦、下弦、斜材、上弦つなぎ材とした。

(2) 屋根の設置

木橋で利用する木材への劣化外力を軽減するものとして屋根付き橋の効用が古くから説かれてきた。屋根付き橋の問題点はその効用ではなく設計の難しさにあることが指摘されているが、本研究では、カバー設置あるいは無処置に対する対照条件として屋根を設置するとともにその効果の検証を行う。

ここでは、屋根勾配を3/10とするとともに、軒の出を橋高3mに対して600mmおよび300mmの2種類設定することにした。設置した屋根の耐風設計は行ったが、屋根設置が橋に与える影響については検討していない。

(3) 格点部の排水機構

旧かっぱ橋では下弦材のトラス格点に滞水が生じやすい構造になっていたことから、架橋中にも何度か改良が試みられてきた。本研究では、格点部への雨水の浸入及び部材中への水の侵入を防ぐ処置について検討することとした。前者については部材カバーの延長線上のカバー設置を行うこととした。後者については、接合部等から部材内部への水の浸透を抑制するためのFRP利用技術として近年柳川らにより開発されてきた技術[8)]を試行することにした。また、この格点部に使用される斜材の木口面にはアスファルトコーティングによる防水処理を施すこととした。

2.3 設置環境

設置できる広島県立総合技術研究所林業技術センター内の敷地条件（図-1）から、橋長方向をほぼ東西にして二橋を連続して設置することになった。設置場所を西側のAゾーンと東側のBゾーンに分けると、Aゾーンの東側ではその北側に樹高のある広葉樹があり晩秋には大量に落葉があることが予想された。Bゾーン東端には伐採できない記念樹があることから、Bゾーンにおける架設方向は若干西南西－東北東方向へ振ることとした。また、Bゾーン東端には公道があることから、屋根を設置する場合はなるべく敷地内部になるよう配慮することとした。

Aゾーンに再編第1径間、Bゾーンに再組立第2径間を設置することとした。

2.4 補修実験計画

（1）部材カバーは第1径間を対象としてA-西ゾーンの部材に、また、（2）屋根は第2径間を対象としてB-西ゾーンの部材に設置することとした。（3）のうち格点カバーは第1径間のA-西ゾーンの格点6カ所と第2径間のB-東ゾーンの格点4カ所を対象として設置することとした。FRP補修は、第1径間下流側の下弦材を対象として、A-西ゾーンおよびA-東ゾーンそれぞれ1カ所計2カ所を対象として行うこととした。

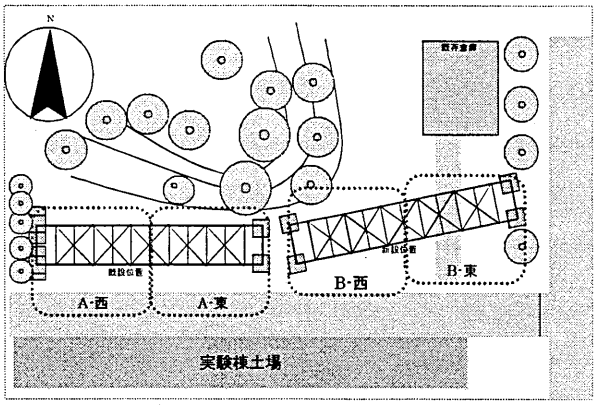

図-1　トラス橋架設場所の周辺状況

2.5 環境改善効果の検証のための測定項目とその方法

部材カバーや屋根設置による効果の検証を行うために、部材の含水率および超音波伝播速度の経時変化の把握、温湿度計による温湿度の連続測を行うこととした。

含水率の測定には高周波式および電気抵抗式の水分計を用いることとした。高周波式水分計にはHM-520（ケット科学研究所製）を用い、密度：0.55、厚さ：40mm、温度：AUTOの設定条件で測定した。電気抵抗式にはPROTIMETER MINI BLD2000-Ⅱ（PROTIMETER製）を使用した。

超音波伝播速度の計測には、コンクリート用超音波伝播時間測定器PUNDIT（CNS Farmell社製）を使用した。基本的な測定方向は積層方向（接着層に垂直）とし、異常が認められた場合には部材断面を3分割して接着層に平行方向の伝播時間も測定した。第1径間については解体した部材を2004年3月に、載荷実験に向けて再組立した後の2007年3月に測定したデータがある。第2径間については解体した部材を2004年3月に、再組立した後の2007年11月に測定したデータがある[9-10]。

温湿度計には、屋外用小型温湿度ロガー（Onset 社製，HOBO Pro v2 Loggers U23-001及びU23-002）を用い、両径間の全25箇所に設置した。測定開始は2008年12月で、以降1時間毎に測定した。

2.6 実験遂行状況

表-1にかっぱ橋の撤去解体から第2径間の再組立、第1径間の載荷実験[11]と再編組立および上述した環境改善処置、また、引き続き行った環境改善効果の検証のための測定を実施した日程をまとめて示す。

載荷実験により破壊した橋長36mのトラス橋（かっぱ橋第1径間）から再利用できる部材を集め橋長18mの木橋に再編し、2008年11月に組立架設した。破壊したトラス橋と同じ供用履歴を持つ橋長18mのかっぱ橋第2径間（2007年9月同センター内に再組立済み）とこの再編した橋を用いて、各種補修技術の効果を検証するための研究計画を策定してその一部を開始した。

表-1　かっぱ橋を用いた実験の経緯

年月		作業内容
2003年	12月	第1径間、第2径間の撤去及び解体
2004年	3月16～19日	第1径間、第2径間解体部材非破壊検査
2007年	3月26～30日	第1径間再組立、第1・第2径間部材の非破壊検査
	7月17～19日	第1径間部材、超音波伝播速度等測定
	9月上旬	第2径間再組立
	11月13～16日	第2径間部材、超音波伝播速度等測定
2008年	5月下旬	第1径間部材、超音波伝播速度等測定
〃	6月18日	第1径間載荷実験
〃	6月下旬	第1径間解体、部材・部品回収
〃	9月上旬	第1径間再編組立用部材　再調査
〃	9月8～12日	トラス格点部の環境改善処置（FRP補修及び木口コーティング）
〃	10月上旬	第1径間再編組立
〃	11月5日	第2径間移設、第1径間再編組立、荷重及び中央変位計測開始
〃	11月25～27日	屋根設置（再編第1径間）、カバー設置（移設第2径間）
〃	12月10～12日	超音波伝播速度及び含水率の測定、温湿度計増設
2009年	4月20～22日	超音波伝播速度及び含水率の測定、温湿度計データ回収
〃	7月16～17日	超音波伝播速度及び含水率の測定

再編組立は、2008 年8 月から部材選択および加工内容を検討し、同年9 月から11 月の間に部材加工・組立・架設・屋根およびカバー追加を完了した。11 月上旬の架設時より、全重量とスパン中央上下流の鉛直変位測定を開始し、屋根およびカバー追加を完了した後となる12 月上旬から各部位の温湿度計測を開始した。部材カバー、格点カバー、屋根の設置および温湿度計の取り付け位置を図-2に示す。

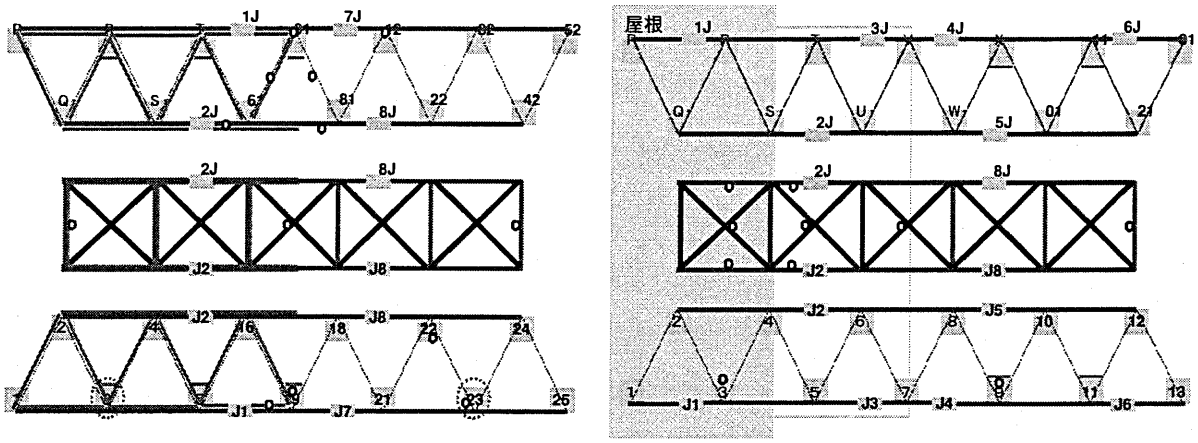

図-2　環境改善処置の箇所および温湿度計設置位置（○印）（左：第1径間、右：第2径間）

3. 結果および考察

3.1 超音波伝播速度

表-2に、2004年以降継続して測定されてきた超音波伝播速度を、部材別、環境改善処置の種類別に平均値で示す。また、表-3に超音波伝播速度測定位置において高周波式水分計により測定した部材の含水率を同様にまとめて示す。

(1) 上弦材

超音波伝播速度による評価において、最も劣化が進行していると思われるのがこの部材である。2007年11月から2008年12月の間に全体的に伝播速度の低下が見られるが、屋根および部材カバーを設置した部材において低下傾向に歯止めがかかったのに対して、処置をしていない部材はさらにその低下が進行している。特に、第2径間の下流側（南側）の上弦材の低下が著しい。

含水率の推移を見ると、無処置部分では平均20％程度であるのに対して、屋根設置箇所では10％近くまで乾燥が進んでいる。なお、カバー設置箇所の2009.07の測定値が高いのは雨天の中カバーをはずして測定したことによる。

(2) 下弦材

2007年11月から2008年12月の間に伝播速度の低下が見られる箇所が多いのは上弦材と同様であるが、環境改善処置以降の傾向には若干の差が見られる。部材カバーを設置した部材については伝播速度の低下傾向に一定の歯止めがかかっているが、無処置の箇所はもとより屋根を設置した箇所においても低下傾向が継続している。特に、上流側（北側）の部材で伝播速度の低下傾向が強く、これらの部材は含水率も高いことがわかる。下弦材では屋根の設置による雨水遮断効果が上弦材に対するほど無く、また、日照が遮られる分、部材の乾燥程度は低くなることが考えられる。なお、軒の出の長さの違い（600mmおよび300mm）により、下弦材への雨がかりの状況が違うことが観察されており、今後の観測によりその影響を検討する予定である。

(3) 斜材

斜材の上部は、雨水の浸入や直射日光があたることもなく元々の劣化も少ないが、再架設後の変化もほとんど無い。若干ではあるが含水率が高く、伝播速度も低下の傾向がある第1径間無処置部分については、上弦材の劣化が甚だしいこともあり、今後注視しておく必要があろう。同じ箇所の斜材の中間部も同様の傾向にある。

斜材の下部（格点周辺）では、伝播速度が徐々に低下している箇所があるが、環境改善処置と

の関連、含水率との関係などでは十分説明出来ない部分があり、今後も注視していく必要がある。

表-2　超音波伝播速度の測定結果　　（単位：m/sec）

部材	測定年月	屋根（第2径間）			カバー（第1径間）			無処置（第2径間）			無処置（第1径間）		
		上流	下流	平均	上流	下流	平均	上流	下流	平均	上流	下流	平均
上弦材	2004.03	1690	1176	1433	1452	1350	1405	1616	1140	1378	1382	1414	1398
	2007.03	1938	1366	1652	1505	1390	1452	1628	1535	1582	1248	1586	1417
	2007.11	1673	1369	1521	1421	1296	1363	1673	1418	1545	1129	1391	1260
	2008.12	1485	471	978	1066	1128	1095	948	1115	1031	1093	1350	1221
	2009.04	1494	601	1047	1222	1167	1197	1031	677	854	649	1026	837
	2009.07	1142	496	819	1250	1147	1203	669	165	417	550	850	700
下弦材	2004.03	1539	1813	1659	1614	1807	1721	1713	1851	1748	1714	1533	1618
	2007.03	1894	2010	1944	1784	1920	1860	1871	1928	1899	1356	1832	1608
	2007.11	1852	1966	1902	1589	1840	1728	1878	1970	1924	1366	1663	1523
	2008.12	1454	1813	1611	1674	1642	1656	1837	1878	1857	859	1819	1367
	2009.04	1400	1835	1590	1571	1795	1695	1516	1756	1636	449	1792	1160
	2009.07	1122	1799	1418	1589	1724	1664	1343	1384	1364	436	1800	1158
斜材　上	2004.03	1873	1943	1908	1964	1934	1949	1925	1921	1923	1860	1867	1863
	2007.03	1986	2037	2011	2025	2049	2037	2021	2027	2024	1978	1944	1961
	2007.11	1930	1982	1956	1993	1957	1975	1958	1962	1960	1935	1868	1901
	2008.12	1841	1974	1907	1986	1885	1936	1906	1957	1932	1935	1765	1850
	2009.04	1855	1861	1858	1937	1846	1892	1860	1936	1898	1878	1833	1856
	2009.07	1805	1844	1825	1920	1771	1845	1854	1915	1884	1740	1858	1799
斜材　中	2004.03	1784	1776	1780	1899	1849	1874	1778	1779	1778	1818	1836	1827
	2007.03	2007	1963	1985	1993	2002	1997	1961	1942	1952	2003	1980	1992
	2007.11	1899	1983	1941	1951	1937	1944	1886	1934	1910	1903	1895	1899
	2008.12	1755	1967	1861	1854	1763	1809	1850	1863	1857	1800	1710	1755
	2009.04	1872	1868	1870	1878	1822	1850	1753	1842	1797	1761	1797	1779
	2009.07	1840	1924	1882	1789	1692	1741	1800	1796	1798	1469	1715	1592
斜材　下		格点カバーなし			格点カバーあり			格点カバーあり			格点カバーなし		
	2004.03	1393	1911	1652	1769	1862	1815	1842	1775	1808	1661	1790	1725
	2007.03	1771	2040	1906	1948	1990	1969	1977	1932	1955	1731	1948	1839
	2007.11	1766	2025	1896	1492	1867	1679	1960	1872	1916	1071	1704	1388
	2008.12	1392	1920	1656	1794	1828	1811	1981	1750	1866	999	1701	1350
	2009.04	1200	1933	1566	1755	1738	1746	1904	1713	1809	1484	1661	1572
	2009.07	1446	1891	1669	1715	1677	1696	1744	1559	1651	1567	1613	1590

表-3　高周波式水分計による含水率測定結果　　（単位：%）

部材	測定年月	屋根（第2径間）			カバー（第1径間）			無処置（第2径間）			無処置（第1径間）		
		上流	下流	平均	上流	下流	平均	上流	下流	平均	上流	下流	平均
上弦材	2007.11	20.9	21.7	21.3				26.2	28.3	27.3			
	2008.12	19.5	21.1	20.3	17.3	14.3	15.8	44.9	51.5	48.2	21.3	29.7	25.5
	2009.04	11.9	12.8	12.4	9.3	9.6	9.4	30.7	23.5	27.1	12.4	14.4	13.4
	2009.07	11.3	10.4	10.9	25.2	16.2	20.7	18.0	16.9	17.5	26.3	18.2	22.0
下弦材	2007.11	20.1	18.7	19.4				20.0	14.8	17.2			
	2008.12	29.6	20.2	25.1	19.8	14.3	16.9	28.6	23.6	26.1	28.6	15.1	21.4
	2009.04	19.6	11.8	15.7	10.9	13.3	12.1	19.6	11.2	15.4	17.8	10.8	14.1
	2009.07	17.7	10.8	14.2	16.4	15.1	15.8	18.9	11.8	15.4	25.9	12.9	19.1
斜材　上	2007.11	15.3	16.2	15.8				18.3	19.3	18.8			
	2008.12	12.4	13.0	12.7	16.7	11.4	14.3	16.1	12.6	14.3	15.1	12.1	13.7
	2009.04	11.5	11.7	11.6	13.2	11.4	12.3	13.1	10.4	11.8	12.6	10.4	11.5
	2009.07	12.1	13.0	12.6	14.8	13.7	14.2	14.1	10.6	12.3	16.0	12.8	14.4
斜材　中	2007.11												
	2008.12	16.6	16.3	16.5	15.6	13.3	14.5	21.2	20.2	20.7	15.5	15.5	15.5
	2009.04	10.3	10.1	10.2	12.0	10.8	11.4	13.7	10.6	12.1	13.3	10.5	11.9
	2009.07	9.2	11.0	10.1	15.4	14.1	14.8	11.6	11.7	11.6	17.9	15.4	16.7
斜材　下		格点カバーなし			格点カバーあり			格点カバーあり			格点カバーなし		
	2007.11	15.8	14.0	14.9				18.0	15.7	16.7			
	2008.12	24.6	18.2	21.4	15.9	14.8	15.4	20.6	22.7	21.6	17.5	16.4	17.0
	2009.04	14.2	11.8	13.0	13.3	10.8	12.0	15.2	16.5	15.8	14.5	10.1	12.3
	2009.07	13.7	11.8	12.8	17.9	16.9	17.4	16.2	16.3	16.2	20.0	16.4	18.2

3. 2 温湿度

2009年4月16日（終日曇天）から4月17日（終日快晴）にかけて、太陽光等に直接晒される屋外環境(第1径間:対傾構ブレース)、屋根下（第2径間)、部材カバー内部（第1径間：上弦材）においてHOBOにより測定された温度データと、三次市のアメダスデータ[12]（気温、日照時間）とをまとめて図-3に示す。

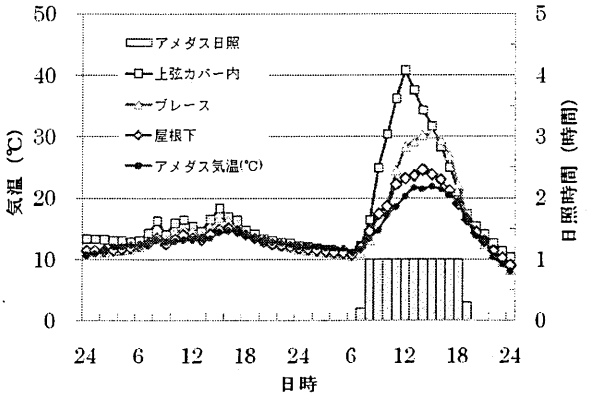

図-3　各種環境改善処置による微気象変化

アメダスの気温データとの温度差は、日照の有無で大きく変わり、日照があった場合その差は、屋根下で最大3.6℃、ブレースで最大8.7℃であったが、部材カバー内では20.5℃にも達した。前述したように、かっぱ橋では架設当時から上弦材には部材カバーが設置されていたが、解体時の部材調査では上弦材上面には大きな干割れが生じていたことが明らかとなっている。4月中旬で40℃を超えていたことから盛夏においてどの程度まで上昇するかといった現象面とともに、このような高温が木材に与える影響について考察できる方向で研究を進めたい。

4. おわりに

実橋を利用しての環境改善効果について、処置後半年間で幾つかのことが明らかになってきた。今後、これらのデータ収集を継続するとともに、再架設された2橋を用いた補強技術の検証についても研究計画を立案していきたい。

参考文献

1) 澤田圭・佐々木貴信：腐朽による木質構造ドリフトピン接合部のせん断性能の変化、第５回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp45-51, 2006
2) 渡辺　浩・小松幸平・森　拓郎：錦帯橋古材の残存強度と診断法の検討、第６回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp105-113, 2007
3) 黄　元重・金高　悟・佐々木貴信：RESISTOGRAPH を用いた木橋部材の劣化診断、第７回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp101-105, 2008
4) 渡辺 浩・藤田和彦・宮武　敦・佐久間太亮：用倉大橋の地覆と高欄材の健全度診断の検討例、第７回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp111-119, 2008
5) 植野芳彦・渡辺　浩・原田浩司：常磐橋の診断・補修と維持管理技術、第６回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp93-99, 2007.
6) 藤田和彦・野沢浩二・木村誠二・渡辺　浩：架設後 14 年経過した用倉大橋の維持管理、第 7 回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp105-111, 2008.
7) 軽部正彦他6名：再組立した既存木造トラス橋の載荷破壊試験（その6）再編組立架設と屋根・カバーの設置、第59回日本木材学会大会研究発表要旨集CD-ROM, PH017, 2009.
8) 地域材利用促進のための非住宅用部材への新用途開発、森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果集 18，2007.
9) 加藤英雄他７名：13 年間使用された木造トラス橋部材の超音波伝播法による非破壊検査、日本木材加工技術協会第 25 回年次大会，pp89-90, 2007
10) 原田真樹他10名：ベイマツトラス橋部材の非破壊測定値の分布性状および劣化との関係、第7回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, pp.119-128, 2008.
11) 軽部正彦他6名：13年の供用履歴を持つ既存木橋の載荷破壊実験、第7回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, pp.129-135, 2008.
12) 気象庁ホームページ 気象統計情報　http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index