

論文・報告

ゆでじま
湯出島橋耐震補強工事の施工報告～鋼上路式ローゼ橋における制震ダンパーの設置および
アーチ支承部のコンクリートヒンジ化施工～

Seismic Retrofit in YUDEJIMA Bridge

泉谷 智之 *1
Tomoyuki IZUMIYA額谷 啓司 *2
Keiji NUKATANI田島 久嗣 *3
Hisatsugu TAJIMA栗山 浩 *4
Hiroshi KURIYAMA得永 孝樹 *5
Takaki TOKUNAGA

湯出島橋は、岐阜県岐阜市と富山県高岡市を結ぶ一般国道 156 号に架かる橋梁である。第 1 次緊急通行確保路線に位置付けられており、「緊急輸送道路の耐震補強 3 箇年プログラム」が策定されたが、湯出島橋は特殊な構造を有する橋梁に該当し、このプログラムでは耐震補強を行うことができなかった。

近年、耐震補強工法は著しく進歩しており、新たな制震デバイスが開発・商品化されている。本橋 A1 橋台、P3 橋脚には、シリコン系粘性材の流動抵抗を活用した変位拘束型ダンパーを取り付けた。また、ヒンジ構造であるアーチ支承部は、レベル 2 地震動に抵抗するべく、メナーゼ鉄筋によって既設下部工と一体化を図った。

本文では、耐震補強工事の施工概要と品質を確保するために行った創意工夫について報告する。

キーワード：耐震補強工事、変位拘束型ダンパー、メナーゼヒンジ、マスコンクリート、温度応力解析

1. はじめに

岐阜県岐阜市と富山県高岡市を結ぶ一般国道 156 号は、第 1 次緊急通行確保路線に位置付けられており、並行路線としては、東海北陸自動車道のみとなっている。

湯出島橋（写真 1）が架かる南砺市上梨地内は、世界文化遺産に登録されている飛騨白川郷と五箇山合掌集落を結ぶ間に位置し、同国道は主要観光路線になっている。



写真 1 着工前全景写真（岐阜側から高岡側を望む）

2004 年 10 月に発生した新潟県中越地震、2005 年 3 月に発生した福岡県西方沖地震等を機に「緊急輸送道

路の耐震補強 3 箇年プログラム」が策定されたが、湯出島橋は特殊な構造を有する橋梁に該当し、このプログラムでの耐震補強を行うことが出来なかった。

近年、耐震補強工法は著しく進歩しており、新たな制震デバイスが研究開発・商品化されている。

本稿では、これらの製品を用いた湯出島橋の耐震補強工事の内、主に、制震ダンパーの設置工およびアーチ支承部のコンクリートヒンジ化について、その施工概要と品質を確保するために行った創意工夫について報告する。

2. 湯出島橋に求められる耐震性能^{1),2)}

湯出島橋が該当する特殊橋梁には、トラス橋、ラーメン橋、アーチ橋、斜張橋などの橋梁形式が挙げられ、一般的に規模が大きく、被害を受けた時の機能回復に多大な時間と費用が必要となる。

前述のとおり、湯出島橋は第 1 次緊急通行確保路線に位置付けられていることから、橋の重要度区分は道路橋示方書における「B 種の橋」に区分され、「耐震性能水準 3」が採用されている（表 1）。

レベル 2 地震動に対する「耐震性能水準 3」を確保するため、アーチリブ、支柱、補剛桁と言ったアーチ主部材は「部材健全度 2」が採用されている。また、横構や

*1 川田工業㈱北陸事業部構造技術課 係長

*2 川田工業㈱北陸事業部鋼構造部工事課 総括工事長

*3 川田工業㈱北陸事業部富山工場生産技術課 課長

*4 川田工業㈱北陸事業部構造技術課 課長

*5 川田工業㈱北陸事業部鋼構造部工事課

表 1 湯出島橋に求められる耐震性能

・湯出島橋の耐震性能水準（レベル2地震時）
 橋の重要度区分 B種の橋（第1次緊急通行確保路線）
 耐震性能水準 3

・アーチ橋における想定される損傷部位と修復性について

主要部材	想定される損傷	損傷の影響度	損傷の修復度	備考
アーチリブ、補剛桁	アーチリブの座屈、損傷、定着部の損傷	A	修復ほぼ不可能	1次部材
支柱	座屈、損傷	B	供用下での修復困難	1次部材
対傾構、横構	座屈、損傷、破断	C	供用下での修復可能	2次部材

※損傷の影響度
 A：構造系の崩壊につながる。
 B：構造系の崩壊につながる可能性は低い、使用性、復旧に及ぼす影響が大きい。
 C：使用性、復旧に及ぼす影響は小さい。

・耐震性能3を満足するためにアーチ橋を構成する部材健全度
 1次部材（アーチリブ、補剛桁、支柱） ⇒ 部材健全度2
 2次部材（対傾構、横構等（1次部材以外）） ⇒ 部材健全度4（損傷判定は部材健全度3を目安）

※部材健全度
 部材健全度1 …… 無損傷（弾性的挙動／補修不要）
 部材健全度2 …… 軽微な損傷（耐力・変形性能とも十分／軽微な補修）
 部材健全度3 …… 限定的な損傷（耐力・変形性能とも余裕がある／補修補強により再使用可能）
 部材健全度4 …… 大きな損傷（耐力・変形性能の限界／取り替えが必要）

対傾構と言ったアーチ主部材以外（2次部材）は「部材健全度4」が採用されている。ただし、損傷判定としては「部材健全度3」を目安として、被災時の損傷部材を把握することとしている。

湯出島橋は、上路ローゼ橋であり、道路橋示方書・同解説 V耐震設計編によると、塑性ヒンジの発生箇所がはっきりしない橋、複雑な挙動をする橋に該当することから、耐震設計上、動的照査法を用いる必要がある。また、橋軸方向および橋軸直角方向の耐震挙動を再現するため、3次元モデルが用いられており、有限要素法における梁部材モデルの1つで、材料非線形問題を扱うことができるファイバーモデルが採用されている（図1）。

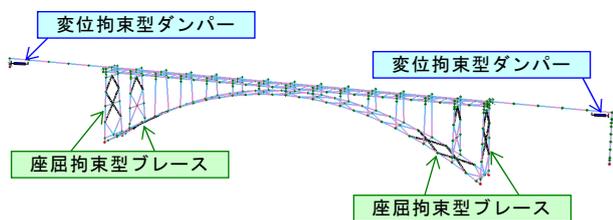


図1 3次元ファイバーモデルおよび制震装置配置状況

3. 工事概要

工事名：一般国道156号道路総合交付金（防災・橋補）
 湯出島橋耐震補強工事
 発注者：富山県 砺波土木センター
 工期：2014年4月1日～2014年12月12日（表2）
 施工場所：富山県南砺市上梨地内

橋梁形式：鋼上路式ローゼ橋、鋼上路式トラス橋、
 単純PC桁橋×4連、鋼単純非合成桁橋、
 鋼単純合成桁橋×3連（内2連）※下線が工事対象

橋長：453.9m（内、202.6m）（図3）
 有効幅員：〔車道〕8.0m、〔歩道〕1.5m
 橋格：1等橋、活荷重：TL-20
 適用道示：昭和47年、竣工：1975年（昭和50年）
 主要工種：制震ダンパー設置工、アーチ支承部補強工、
 橋軸方向固定装置設置工、支承加工 etc.

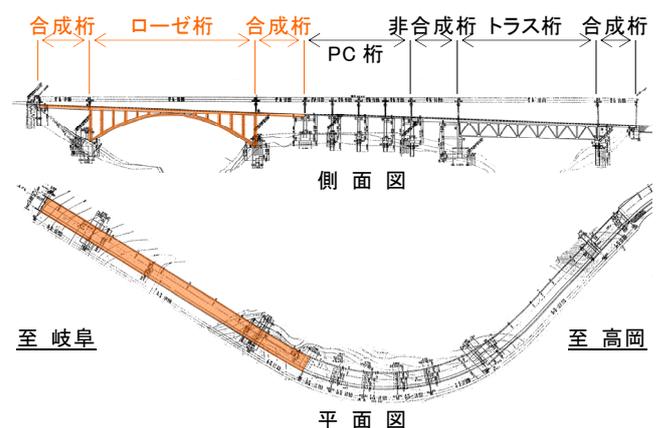


図2 橋梁一般図（現橋製作当時）（着色は工事対象）

湯出島橋は、前年度に一部の耐震補強工事が施工済みであり、該当するアーチリブ横構および支柱対傾構が座屈拘束型ブレースに取り替えられている。同様に、橋軸方向固定構造の内、アーチ径間側のゲルバー部鋼製ブラケットについては取り付け済みであった。



図3 補強一般図(側面図)

P3 橋脚は既に RC 巻立てによる耐震補強が施工済みであり、新たに補強が生じることは好ましくないことから、補強が生じない様に、変位制御ダンパーの容量が調整されている。

4. 橋軸方向固定装置工および支承加工

鋼上路式ローゼ橋の上部工部材の耐震補強として、P1 および P2 橋脚上の支承条件を可動から固定に変更し、側径間部とアーチ径間部が一体として挙動させた方が、A1 橋台および P3 橋脚に設置する制震ダンパーの性能を十分に発揮し、耐震上効果的に働くことから、各種落橋防止システムとは別に、P1, P2 橋脚には橋軸方向固定構造が設計されている。したがって、制震ダンパーの設置に伴い、A1 橋台および P3 橋脚の支承条件は、固定から可動にする必要があった。

(1) 橋軸方向固定装置工

前述のとおり、アーチ径間側のゲルバー部には、橋軸直角方向の変位制限構造を兼ねた橋軸方向固定用の鋼製ブラケットが設置済みである(写真2)。

主桁補強材の設置にあたり、横構ガセットや既済耐震補強工事に取り付けられた落橋防止ブラケットが存在したため、該当部を測量して部材製作に反映させることで、干渉等生ずること無く主桁補強材を設置することができた(写真3)。

既設の橋軸方向固定用ブラケットは、アーチ径間側に設置されており、側径間側に設置したブラケットとは少々芯ずれを起こしていたため、緩衝材の厚さを調整して2枚の連結板を平行に設置させることとした(写真4)。

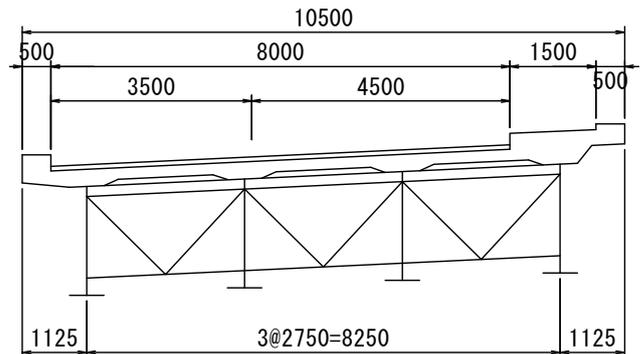


図4 標準断面図



写真2 橋軸方向固定構造 着工前 (P2 橋脚)



写真3 橋軸方向固定構造 設置状況 (P1 橋脚)

表2 全体工程表

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
工場製作									
準備工・後片付け									
制震ダンパー設置工									
橋軸方向固定装置設置工									
アーチ支承部補強工									
支承部加工									
足場工・現場塗装工									

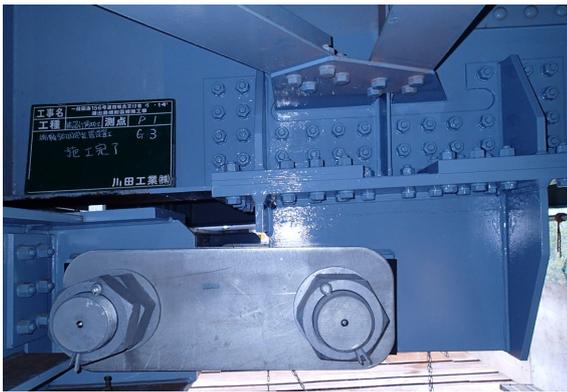


写真4 橋軸方向固定構造 設置完了 (P1 橋脚)

(2) 支承加工

A1 橋台および P3 橋脚は、側径間部の固定端として、BP 支承が収められている。下沓の突起 (幅 220mm) が上沓に設けられた切り込み部 (幅 224mm) の間に入り込み、固定条件を呈している (図5)。



図5 上沓詳細図



写真5 上沓切断状況

支承加工は、上沓の上図ハッチング部分をガス切断し、切り込み部を平滑化して、可動可能な構造へと変更を行った (写真5, 6)。

ガス切断は、狭所における狭隘部での作業となるため、既存の構造を損傷させない様に、細心の注意を払いながら行った。また、支承周囲には、既済の耐震補強工事に取り付けられた橋軸直角方向の変位制限構造 (鋼製ブラケット・ボルト構造) が取り付けられていたため、必要に応じて一時撤去し作業終了後復旧した。



写真6-a 上沓加工前



写真6-b 上沓加工後

5. 制震装置設置工

(1) 変位拘束型ダンパー

A1 橋台, P3 橋脚に設置される変位拘束型ダンパー (以降、制震ダンパー) は、シリコン系粘性材の流動抵抗により地震時の大きな衝撃力を受け止め、入力エネルギーを効率よく吸収・逸散し応答加速度や変位を効果的に抑制する製品が採用された (図6)。



図6 変位拘束型ダンパー (KV ダンパー)

制震ダンパーの設置にあたっては、設置箇所における桁の温度による挙動が大変重要となってくる。アーチ径間部に側径間部を一体化させて、支承の固定可動条件を変更させる本工事では、温度による桁の移動方向が変更前後では異なるため、施工手順を踏まえた温度管理を行った (図7, 8)。

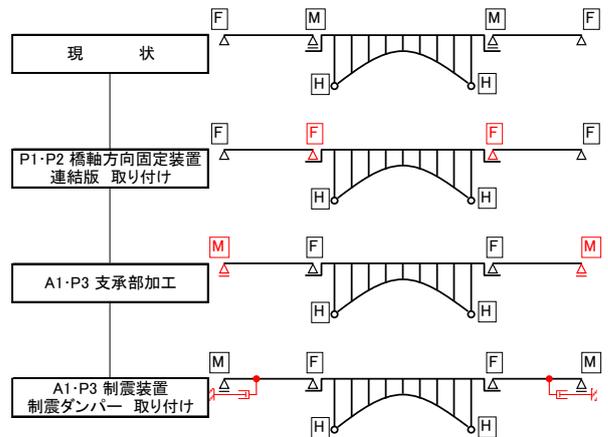


図7 制震ダンパー取り付けフローチャート

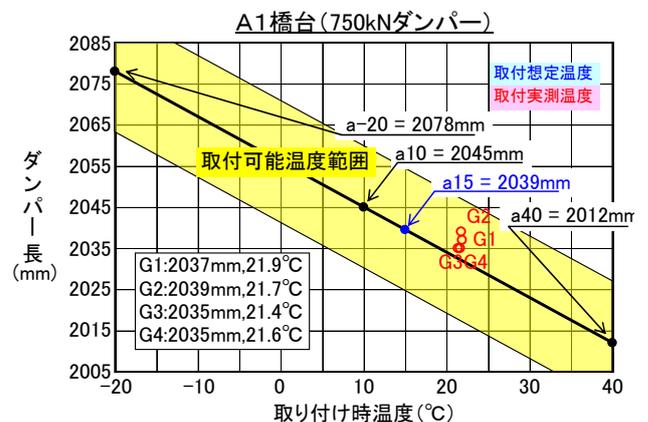


図8 取り付け時温度とダンパー長のグラフ



写真7 制震ダンパー設置状況

制震ダンパーは、ある程度速度をもった外力に対しては剛性が非常に高いため、現場でストロークを調整することは困難となる。そこで、制震ダンパー取付時の温度を想定して、取付時設計長よりも20mm短いストローク長で両端クレビスを仮固定して、現地搬入・設置することとした(写真7)。

シリンダーの太くなっているところは、保護パイプ(カバー)であり、玉掛け索が掛からない様、仮固定材を吊って設置作業を行った。

以上の配慮から、取付時を想定した製品長に対して、適切な取付間隔の元、制震ダンパーを納める事ができた(写真8)。



写真8 制震ダンパー設置完了

6. アーチ支承部補強工

(1) 設計概要

湯出島橋は上路式ローゼ形式であり、アーチ支点部はヒンジ構造となっている。ただし、ヒンジ部はレベル2地震動を想定した設計が行われていないことから、従来のタイプA支承(支承単体ではレベル2地震動の耐力を有していない)と見なされる。

ヒンジ部はアーチ構造を支える重要部材であり、レベル2地震動に対する耐力を有する必要があるが、支承本体を取り替えるのは困難なため、タイプB相当の支承として耐力を有し、橋軸直角方向の地震力に対して負反力が生じない様な構造が求められた。

そこで、最下段水平支材をコンクリートで巻立て、メナーゼ鉄筋で基礎工と一体化する案が採用された

(図9)。

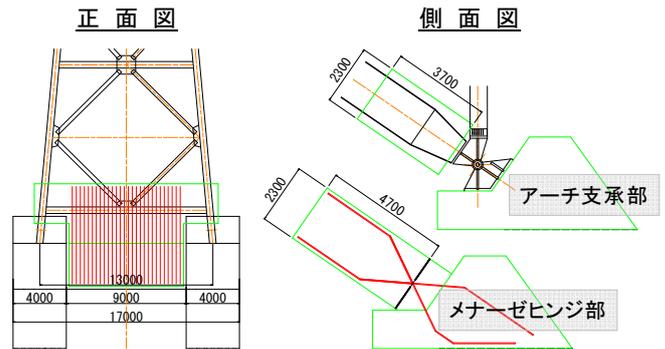


図9 アーチ基部メナーゼヒンジ構造

(2) マスコンクリートのひび割れ対策

メナーゼヒンジの施工は、既設下部工に接する3面に拘束されたマスコンクリート施工となるため、熱影響によるひび割れの発生が懸念された(図10)。

マスコンクリートとは、部材断面の最小寸法が大きく、かつセメントの水和熱による温度上昇で有害なひび割れが入るおそれがある部位のコンクリートを示す。

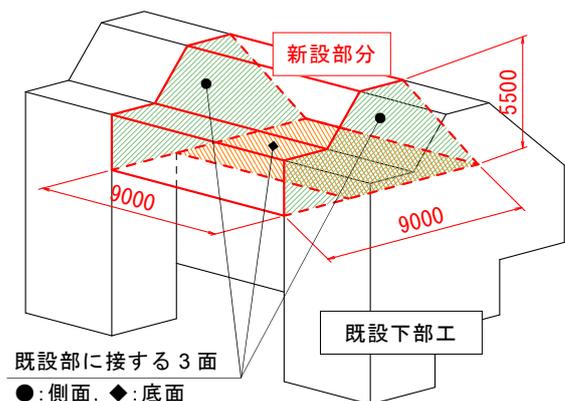


図10 下部工全体図(P1基部)

そこで、現設計におけるひび割れ発生の可能性およびセメント特性や誘発目地設置に着目したひび割れ抑制効果を検証するために、温度応力解析を実施した。

温度解析は、3次元の解析モデルを用いて、当初設計の配合を含む、セメント、打込み温度、目地箇所数に着目した計6ケースについて解析を行った(図11)。

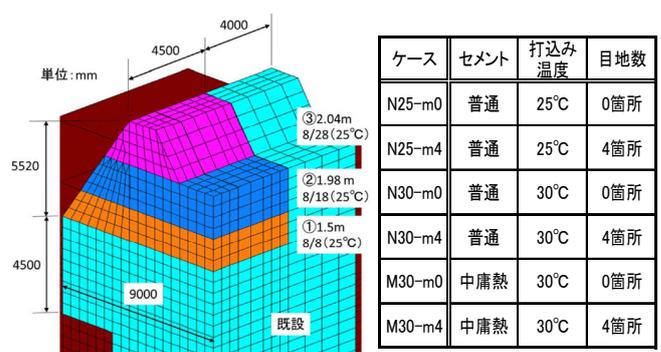
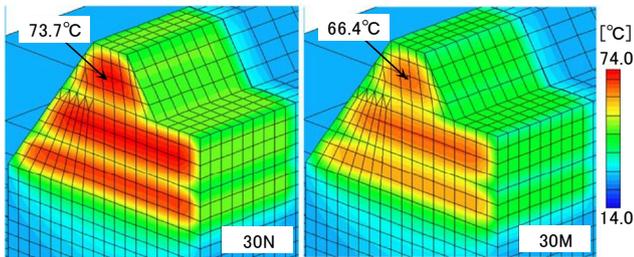


図11 3次元1/2モデルおよび解析ケース

解析より、普通ポルトランドセメントから中庸熱ポルトランドセメントへ変更することで、コンクリート内部で発生する水和熱を 7°C 程下げられることが判明した (図 12)。また、当初計画されてなかった目地を 4 箇所 (目地間隔 3m 以下) 併設することで、橋軸直角方向の応力を 2.5N/mm² 程低減できることが判明した (図 13)。



(a) 普通ポルトランドセメント (b) 中庸熱ポルトランドセメント
図 12 温度分布 (打込み温度 30°C)

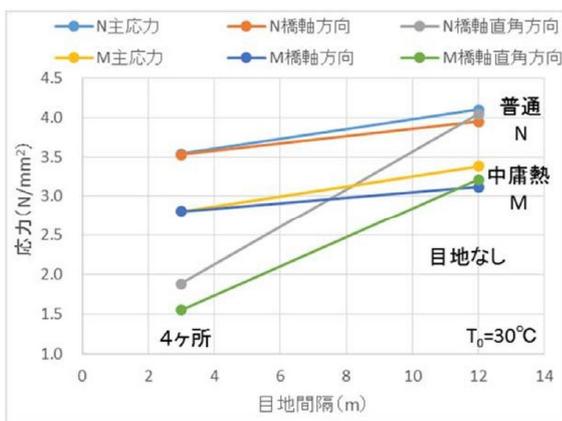


図 13 目地間隔と発生応力の関係

図 14 に使用セメント毎の目地間隔と最小ひび割れ指数の関係を示す。ひび割れ指数とは、コンクリートに発生する引張応力に対する引張強度の比と定義されており、式(1)より求められる。その値が大きいほどひび割れ発生のリスクは小さい。一般に、ひび割れの発生を許容するが、ひび割れ幅が過大とならない様に制限したい場合、安全係数 γ_{cr} は 1.0 以上としている。

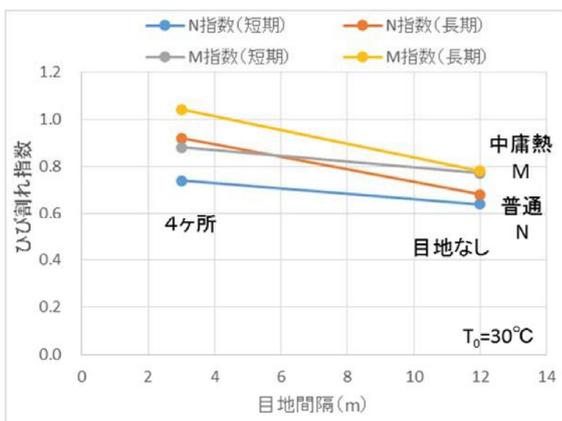


図 14 目地間隔と最小ひび割れ指数の関係

$$I_{cr}(t) \geq \gamma_{cr} \dots \dots \dots \text{式(1)}$$

ここに、 $I_{cr}(t)$: ひび割れ指数

$$I_{cr}(t) = f_{tk}(t) / \sigma_t(t)$$

$f_{tk}(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリート引張強度

$\sigma_t(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリート

最大主引張応力度

γ_{cr} : ひび割れ発生確率に関する安全係数

(一般に、1.0~1.8 としてよい。)



写真 9 アーチ基部コンクリート施工完了 (目地設置状況)

当初設計 (普通ポルトランドセメント/目地 0 箇所) では 0.7 程度であったひび割れ指数が、中庸熱ポルトランドセメントおよび目地 4 箇所に変えることによって、1.0 以上となることが判明した。本結果は発注者へ報告・提案の上、実施工へ反映させて、有害なひび割れを一切発生させること無く、アーチ基部コンクリートの施工を完了することができた (写真 9)。

7. おわりに

湯出島橋の耐震補強工事は、アーチ基部コンクリートの施工を終え、背面盛り土復旧および足場撤去を経て、2014年12月に無事竣工を迎えることができた (写真 10)。



写真 10 完成写真 (左岸上流側より)

最後に、本工事の施工にあたり、富山県砺波土木センター並びに(株)建設技術研究所、富山県立大学・伊藤准教授、協力業者の方々には、多大なるご指導・ご協力を賜りました。本紙を借りて厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) (株)建設技術研究所：平成 24 年度一般国道 156 号道路総合交付金 (全国防災・耐震) 湯出島橋耐震補強詳細設計委託報告書 平成 24 年 10 月。
- 2) 富山県建設技術協会：建設技術研究発表論文集, No.27, 2014.