

北陸新幹線長野・金沢間 における鉄道建設技術

吉岡 浩司¹・林 岳大²・加瀬 正樹³・浅見 均⁴

¹正会員 鉄道・運輸機構 富山工事事務所 計画課 (〒930-0856 富山市牛島新町5-5インテックビル内)
E-mail:kou.yoshioka@jrtr.go.jp

²鉄道・運輸機構 富山工事事務所 計画課
E-mail: ta.hayashi@jrtr.go.jp

³鉄道・運輸機構 富山工事事務所 計画課
E-mail:m.kase@jrtr.go.jp

⁴正会員 博士(工学) 鉄道・運輸機構 富山工事事務所
E-mail:hit.asami@jrtr.go.jp

本論文では、平成27年3月14日に開業した北陸新幹線(長野・金沢間)の建設に際し、北信越地方特有の地理条件のもと新幹線建設において導入されたトンネル、橋梁の技術をレビューすることにより、北陸新幹線の社会的意義を現時点(開業直後)で論考するものである。

Key Words : Shinkansen, Evaluation for Railway Construction Engineering

1. 研究の目的

平成27(2015)年3月14日に北陸新幹線長野・金沢間(以下“北陸新幹線”と略す)は完成、「かがやき」「はくたか」等の列車が営業を開始し、首都圏と北陸三県を直結するようになった。

整備新幹線については「国土交通省所管公共事業の事後評価実施要領」に基づき、事業完了後の利用者、住民生活、地域経済等への効果・影響の事後評価が開業区間毎に実施されており、これらを基礎とする研究成果が発表されている(長谷川ら¹⁾、末原ら²⁾、松崎ら³⁾、今井ら⁴⁾)。北陸新幹線も今後事後評価対象となるが、最初の評価時点は開業5年後となる。

また、整備新幹線における個別具体的な技術要素に関する研究は多数存在しており、北陸新幹線のトンネルに関連する学位論文に限定しても、北川⁵⁾、岡崎⁶⁾、剣持⁷⁾、木内⁸⁾、依田⁹⁾などの成果を挙げることができる。

ここで本研究は、北陸新幹線を技術要素の集積、すなわち一つの交通システムとして捉えたいうえで、鉄道建設技術の総体について、完成直後の時点で評価することを目的とする。また、この評価を通じて、北陸新幹線の鉄道建設技術が沿線地域社会に及ぼす意義の抽出を試みるものである。

2. 北陸新幹線の概要

北陸新幹線長野・金沢間は、全国新幹線整備法(昭和45年法律第71号)に基づき、運輸大臣により決定された整備計画5新幹線のうちの1路線である。

北陸新幹線は、区間延長228km、工事延長は231kmである。長野・新潟・富山・石川の4県を通過し、今回開業区間では7駅が新設されている。

北陸新幹線の建設基準を表-1、構造物種類と延長を表-2、北陸新幹線概要図を図-1に示す。

表-1 北陸新幹線 建設基準

最高設計速度	260km/h
最小曲線半径	基本 4000m
最急こう配	30‰
軌道中心間隔	4.3m
電車線の電気方式	25,000V(交流)

表-2 北陸新幹線 構造物の種類と延長(率)

切取・盛土	3.7km	1.7%
橋梁	23.4km	10.1%
高架橋	101.3km	43.8%
トンネル	102.7km	44.4%
合計	231.9km	100.0%

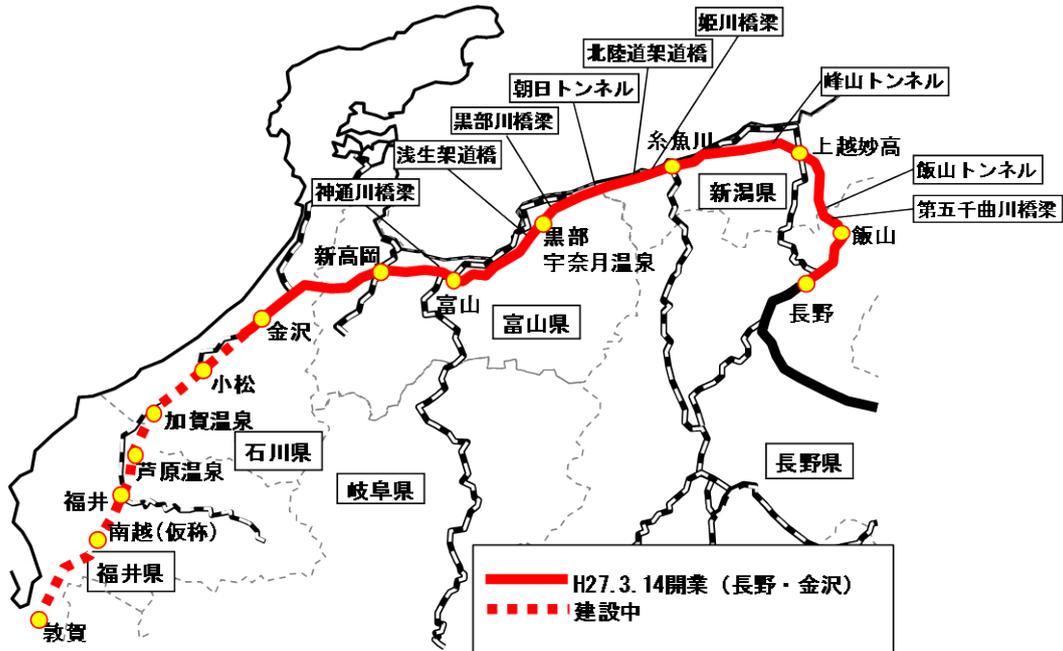


図-1 北陸新幹線（長野・金沢）概要図

3. 北陸新幹線の主要なトンネル

北陸新幹線の主要なトンネルの概要について、起点側より述べる。

(1) 飯山トンネル

飯山トンネルは、延長が約23.3kmで北陸新幹線では最長、国内第4位の長さのトンネルである。



写真-1 多重支保工法

本トンネルの北東約20km付近には、建設時において大きな膨張性土圧が発生し、施工が著しく難航した北越北線（ほくほく線）の鍋立山トンネルがあり、地形・地質が類似していたことから同様な現象の発生が懸念された。このため、平成10年11月に「飯山トンネル他特別委員会（委員長：足立紀尚京都大学名誉教授）」を設置し、軟岩の地山特性の検討や土圧の発生機構の解明などを行った。

また、本トンネルはフォッサマグナの東縁に位置し、

褶曲や断層帯の多い非常に複雑な地質構造である上に、膨張性を示す地山や高圧の湧水が発生する区間が多い。また、可燃性ガスの発生を伴う区間が長く、安全に工期内に掘削することが課題であったため、以下の施工技術を開発・採用した。

- a) 多重支保工による膨張性地山掘削法の確立
 - b) 長尺・短尺ボーリングと湧水圧管理法をシステムチックに組み合わせた切羽管理手法の開発
 - c) 防爆型大型換気設備による可燃性ガスの希釈
- これらの新技術により安全・安定した掘削進行を確保し、コスト低減に寄与することができ、今後類似地質での長大トンネル施工に大いに寄与するものとされ、平成20年土木学会技術賞を受賞している。

(2) 峰山トンネル

峰山トンネルは、新潟県名立町から能生町に至る全長約7.0kmの長大トンネルである

山岳トンネルの標準工法であるNATMにおいて、急速施工技術の開発は重要課題のひとつであった。



写真-2 初期高強度吹付コンクリート施工状況

峰山トンネル西工区では、事前の地質調査などで対象地山の湧水が少ない等の地質状況を詳細に把握できたことから、従来の数倍の施工速度を目標とする急速施工を目指し、初期高強度型吹付コンクリートの開発、開発した吹付コンクリートとロックボルトによる新支保パターンの採用、自動掘さく制御システムを搭載した大型掘さく機械の導入など新技術の開発・採用を積極的に行った結果、平成15年3月に当時の国内最高記録である月進304mを実現した。これらの新技術の開発により、平成17年土木学会技術開発賞を受賞している。

(3) 朝日トンネル

朝日トンネルは、全長が約7.6kmで北陸新幹線（長野・金沢間）においては2番目の長さである。東工区、西工区と分割して施工を行った。東工区は断層破碎帯において内空変位量が550mmを超える区間があり、SFRC吹付コンクリート及び鋼製ストラットによる上半仮閉合、多重構造支保工を採用した。また、西工区においては当時としては事例の少なかった連続ベルトコンベアーによるずり出しを採用し、掘削作業の効率化および坑内環境の改善を図った。



写真3 朝日トンネル西工区

4. 北陸新幹線の主要な橋梁等

北陸新幹線の主要な橋梁・高架橋の概要について、起点側より述べる。

(1) 第五千曲川橋梁

第五千曲川橋梁は、中野市と飯山市の境界付近に位置し、河川幅約540mの千曲川を斜角約60°で渡河する橋長751mの3径間連続合成箱桁3連からなる長大橋梁である。

橋梁の構造形式は、長大スパンへの対応、短期施工の対応、耐震性、騒音・振動対策の観点を考慮し、じん性が高く、架設性に優れ、軽量である鋼構造とし、鉄道橋としては日本第2位のスパンの鋼合成箱桁が採用された。

構造は、橋長751m、鋼材重量約6,210t、コンクリート量5,560m³の3径間連続合成桁3連で構成され、整備新幹線で最大の鋼鉄橋である。

また、沿線に対する振動・騒音対策として、民家に最

も近接している第3橋には、桁内部のウェブ面すべてに制振材を貼付け、さらに桁の下フランジ面には制振コンクリートを打設し、周辺環境への配慮を行っている。



写真4 第五千曲川橋梁全景

(2) 姫川橋梁

姫川橋梁は、橋長 457m、最大支間長 70m の 7 径間連続 PC フィンバック橋である。姫川橋梁は、新幹線の橋梁として初めてフィンバック形式を採用した。

姫川橋梁では、堤防管理用道路の空頭を確保すること、新幹線の線路縦断を低く抑えることを実現するために、桁の断面形状を中路構造（桁断面の上部に軌道を設ける構造を「上路構造」、桁断面の中部に軌道を設ける構造を「中路構造」、桁断面の下部に軌道を設ける構造を「下路構造」という）を採用した。

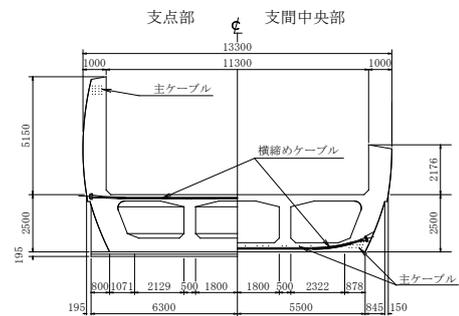


図2 中路構造断面図

橋面上に突出させたウェブ断面で中間支点部の負の曲げモーメントとせん断力に対して抵抗させることができ、支点上部に PC ケーブルを配置することにより偏心量を大きく取れ、桁高を変えることなく桁下空間を確保でき、縦断勾配を低く抑える事が可能であることが主な特徴である。

本橋梁は海岸線から 700m という塩害環境下にあったため、水セメント比の制限、かぶりの増厚、分割打設による施工目地のエポキシ鉄筋使用を徹底した。

また、フィンバック部に曲線形状を採用することにより柔らかさを表現し、側径間のフィン高は隣接する高架橋の防音壁高さとも一致させ、電柱基礎はフィン内側に配置することにより、隣接する高架橋との連続性を有し、

背景の山並みに溶け込むなど周囲の景観に調和し、北陸新幹線長野-金沢間のシンボルの一つとなっている。



写真-5 姫川橋梁全景

(3) 北陸道架道橋

北陸道架道橋は、新潟県糸魚川市青海に位置し、海塩粒子が多く飛来する厳しい環境下で、北陸自動車道を斜角 15°で交差する橋長 393m (3 径間連続充填鋼管複合桁 107m、4 径間連続ダブル合成桁 247m、単純合成桁 39m) の橋梁である。

本橋梁は、日本海側の海岸線からわずか 600m しか離れておらず、通常の JIS 耐候性鋼材を使用することができなかったことから、世界で初めてニッケル系高耐候性鋼 (Ni 鋼) を採用した。ニッケル系高耐候性鋼は耐塩分性を向上させた耐候性鋼として平成 10 年に開発製品化され、本橋梁に初めて採用された。その後現在まで、鉄道橋においては複数の箇所 Ni 鋼が採用されている。

また、3 径間連続充填鋼管複合桁は、市場性のある丸型鋼管にコンクリートを充填しコンクリート床板を複合した充填鋼管複合桁という世界初の構造形式を採用した。(海老名¹⁰⁾)

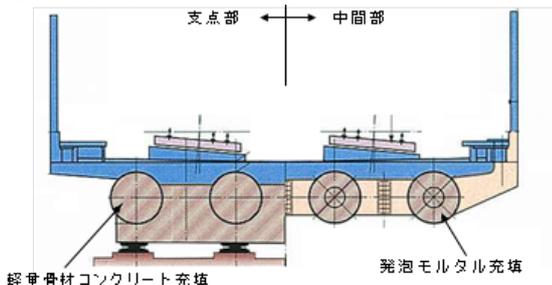


図-3 充填鋼管複合桁断面図



写真-6 北陸道架道橋全景

(4) 黒部川橋梁

黒部川橋梁は、富山県東部に位置する黒部川扇状地の中央部を流れる一級河川黒部川を渡る全長 761m の 15 径間からなる PC 箱桁橋である。このうち中央の 6 径間 344m で、鉄道橋で初めて波形鋼板ウェブ連続 PPC 箱桁を採用している。

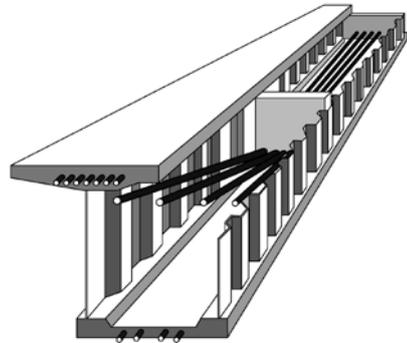


図-4 波形鋼板ウェブ連続 PC 箱桁

波形鋼板ウェブ PC 箱桁形式は、PC 箱桁橋の自重の 2~3 割を占めていたコンクリートウェブを軽量の波形鋼板に置き換えたもので、コンクリートの上・下床板と波形鋼板ウェブを組み合わせた複合構造は、鋼とコンクリートの特性を生かした PC 橋の構造形式である。

鋼板を波形にすることにより、高いせん断座屈強度が得られ、コンクリートの上下床板に効率的にプレストレスを導入できる。また、軽量の波形鋼板ウェブを用いることにより、主桁重量を約 2 割減らすことができ、下部工を小さくすることで橋梁全体の外観が大変スマートなものとなっている。



写真-7 黒部川橋梁全景

(5) 浅生架道橋

浅生架道橋は、富山県魚津市に位置し早月川付近において北陸自動車道と斜角 22° で交差する。本架道橋は、橋長 210m、中央径間 110m を有する 3 径間連続合成箱桁であり、鋼鉄道橋の合成桁では国内最長の支間を有する。

本橋梁は、北陸自動車道を跨ぐことから、桁下空頭を十分確保する必要があったこと、また、この支間長を

現するため主桁高4.6m、ウェブ間隔6.3m、鋼重約1650tを有する大断面の複線1主箱桁構造を採用した。

架設地点は、日本海側の海岸線より5kmに位置し飛来塩分が多く、腐食環境が厳しい地域にある。整備新幹線において飛来塩分の多い地域の防食対策は、これまでニッケル系高耐候性鋼材を適用し、これに鍍安定化处理を施してきたが、本橋梁施工時はニッケルなどの合金元素の価格が高騰したため、一般鋼材に金属溶射を施した仕様を整備新幹線で初めて採用した。また、耐久性を向上させるためにポリウレタン系塗料の重防食塗装を行った。



写真-8 浅生架道橋全景

(6) 神通川橋梁

神通川橋梁は、JR富山駅の西側に位置し、一級河川神通川（幅員約420m）を、JR高山本線と平行して渡河する橋長428m、最大支間長128mの4径間連続PCエクストラドーズド橋である。



写真-9 神通川橋梁全景

なお、最大支間長128mは、PCエクストラドーズド橋（鉄道橋）としては国内第2位の長さとなっている。

道路橋では支間長が長くなる場合、構造物を軽量化できる斜張橋が代表的であるが、高速走行する新幹線では、軌道にミリ単位の精度が要求されるため、桁のたわみを抑える必要があることや、河川内工事であるため、施工

は非出水期に限定されることなど、スパン割や工期の面で制約条件があるため、道路橋でよく使われる斜張橋と、鉄道橋でよく使われるコンクリート橋（PC橋）の長所を組合せたPCエクストラドーズド橋を採用した。

また、ケーブル保護管は白色のものを使用し、周囲の景観に溶け込んでおり、地域のランドマークとして親しまれている。

(7) 馬桁一体PC橋群

新幹線建設において高速性を確保する観点から、平面線形は駅部など特殊な区間を除き半径4000m以上、縦断線形は基本的に15%以下としなければならないため、縦断線形のコントロールポイントである道路等の桁高が高くなると前後の広範囲にわたり縦断線形が高くなり、建設費の増大につながる。そこで連続桁とするために交差箇所中間支点を設ける方法として門型橋脚方式や馬桁方式などを使用するが、北陸新幹線では、構造高が最も低く建設費の削減にも有効な馬桁一体型PC橋を採用した。（下津ら¹¹⁾）



写真-10 馬桁一体型PC橋

4. 北陸新幹線の最急勾配と車両技術

(1) 北陸新幹線の最急勾配

整備新幹線以前の基準では、新幹線での最急勾配は12%と定められていた。12%を超える急勾配はごく一部区間での特認に限定されており、車両技術もまた連続する急勾配区間走行に十分対応できるものとはいえなかった。

日本の脊梁山脈を貫く北陸新幹線のルート選定にあたっては、最急勾配、路線距離、経由地の兼ね合いが大きな課題であった。最急勾配12%のままでは迂回距離が長くなり、工費が嵩むうえに、所要時間が延びる難点があり、場合によっては主要駅を経由できない可能性もあったからである。ここで、連続急勾配区間走行に十分対応しうる車両技術開発が可能という検討結果が得られたことから、北陸新幹線では最急勾配30%と定められたという経緯がある。（仁杉¹²⁾）

(2) E2系電車

E2系電車はJR東日本管内新幹線全路線で運行されている汎用車で、平成9(1997)年3月の東北新幹線「やまびこ」が最初の営業運転である。

北陸新幹線「あさま」用の車両は8両編成(うちグリーン車1両)で、電動機出力300kW、回生抑速ブレーキ装備、電動車一ユニット解放条件で最急勾配での再起動可など、30%連続急勾配区間での運行に対応している。また、電源周波数は50/60Hz対応となっている。高崎―長野間開業時より使用されているが、近年E7/W7系電車への置換が進んでいる。

(3) E7/W7系電車

E7/W7系電車は、JR東日本・西日本両社が共同開発した車両で、北陸新幹線長野・金沢間延伸開業に向けて開発された。

基本的な性能はE2系と同等以上で、単位重量あたり電動機出力が新幹線歴代最強になるなど、随所に改良点が存在する。「かがやき」「はくたか」「あさま」「つるぎ」に充当され、12両編成(うちグリーン車1両・グランクラス1両)で運行される。



写真-11 E7/W7系電車

※写真はW7系

このE2系電車、E7/W7系電車の技術開発が見込めればこそ、北陸新幹線では30%連続急勾配(碓氷峠・飯山トンネルほか)を有する線形を採用できた。そのため、より短いルート、トンネル区間にあつてはより土かぶりが薄いルートを選定が可能となり、建設コスト削減および所要時間短縮につながった。すなわち、北陸新幹線では車両技術の進歩発展とトンネル橋梁技術とがあいまり、鉄道建設技術の粋に至った。

5. 北陸新幹線の雪害対策

北陸新幹線の雪害対策については、「地域特性を考慮した北陸新幹線長野・金沢間の雪害対策」にて詳述するので、割愛する。

6. 北陸新幹線の特徴

(1) 都市を連担する線形

北陸新幹線は、東京・大阪・名古屋の三大都市圏と環日本海諸国を結ぶ交通の結節点に位置しており、北陸新幹線の開業により、首都圏へのモビリティが大幅に向上している。東京～金沢間の鉄道所要時間は開業前の3時間47分から2時間28分(最速タイプかがやき)となり、約1時間20分の時間短縮が図られた。また、長野～金沢間は、3時間24分から1時間5分(最速タイプかがやき)となり、約2時間20分の時間短縮効果が図られた。

このことは、所要時間の短縮や乗換解消に伴う利便性の向上等の効果をもたらしたとともに、地域の活性化、街・地域の一体感の向上、街・地域に対する誇りの増進といった沿線住民の意識面での効果もみられる。

また、北陸新幹線は、日本海に面する各都市をほぼ網羅した駅配置となる線形を採ることにより、首都圏と迅速に結ぶことができ、沿線自治体の発展に寄与するものとする。

(2) 輸送の安定性および災害対策への効果

北陸新幹線は、最新の雪害対策のほか、列車側面、下部を完全に覆う構造とすることで風速35m/sまで走行可能としている。(在来線は25m/sまで)これらの対策により、冬期の風雪、通期の強風によるダイヤの乱れを解消し通年に亘って列車の定時性が確保されると考える。

(北日本新聞¹³⁾)

地震災害が多く発生する日本の国土において、災害時にも安全かつ高速で安定した輸送を維持するために、新幹線の耐震性能の向上については、過去の震災被害を教訓として継続的に取り組んできた。平成7年1月の阪神・淡路大震災では山陽新幹線の高架橋が倒壊する等の甚大な被害が発生したことを踏まえ、新たに建設する土木構造物の耐震設計に関する設計が見直され、耐震基準が強化された。既に建設されている構造物については、高架橋の柱に鉄板を巻くなどの耐震補強が実施された。これらを踏まえ北陸新幹線は、新たな耐震基準を導入した設計が行われ、既に建設されていた金沢駅の高架橋の柱には鉄板を巻くなどの耐震補強が実施されている。

また、親不知に代表される複雑な地質条件を回避し、風雪、波浪による影響を低減させるため、上越～朝日町間においては、在来線・国道・高速道路よりも内陸側を

通る線形としている。

(3) 利用者数の推移

北陸新幹線の開業3ヵ月後の利用者数は前年の在来線特急はくたか・北越との比較では325%（JR西H27.6月定例社長会見より）となっている。既開業整備新幹線は約120%~140%であり、それを大幅に超えるものとなっており、北陸新幹線沿線各都市と首都圏間の観光、ビジネス等のポテンシャルを顕在化させた形であると考えられる。

表-3 整備新幹線毎利用者数

線区名	北陸新幹線 (長野・金沢間)	東北新幹線 (八戸・新青森間)	九州新幹線 (博多・新八代間)
所要時間			
走行区間	東京～金沢	東京～新青森	博多～鹿児島中央
開業前	3時間47分	3時間59分	2時間12分
開業後	2時間28分	3時間10分	1時間19分
短縮時間	1時間19分	49分	53分
利用者数			
開業前	(8,000)	7,700	17,800
開業3ヵ月	26,000		
開業1年		9,200	24,600
開業後の増加率	325%	122%	138%
備考	開業前：直江津～糸魚川 開業後：上越妙高～糸魚川		

※北陸新幹線利用者数は平成27年6月15日時点の速報値

7. まとめ

北陸新幹線は、飯山トンネルに代表される複雑な地質構造を有する北信越地方の山岳地帯をトンネルで通過し、大規模河川を橋梁で渡河し建設を進めてきた。各地域特有の条件を克服し、最適な工法をもって建設にあたってこれたのは、過去の類似事例で蓄積した技術の参考や、新幹線建設技術の進歩によるものであると言える。

また、E2系からの新幹線車両技術の開発が最急勾配30%の連続走行を可能にし、その結果、最短ルートで主要駅を経由できるものとなった。

総じて建設技術と車両技術の融合が都市間を連担する線形を可能にしている。

新幹線の建設および開業効果の中で大きなものとして、時間短縮効果があげられる。大幅に時間が短縮されたことにより都市間の移動時間が短縮され、周遊範囲が従前よりも広くなり都市間の交流、観光やビジネス等、様々な分野に新幹線開業効果が波及することが期待されている。

参考文献

- 1) 長谷川正明, 加藤浩徳, 浅野憲周: 北陸新幹線(高崎～長野間)の開業効果に関する調査分析, 土木計画学研究・講演集 No.22(2), pp51-54, 1999.
- 2) 末原純, 高津俊司: 九州新幹線部分開業における観光に関する取組みとその効果に関する考察, 土木計画学・講演集 No.40, CD-ROM(No.319), 2009.
- 3) 松崎正紀, 森田宝淳, 高津俊司: 九州新幹線部分開業による地元経済波及効果に関する考察, 土木計画学・講演集 No.42, CD-ROM(No.27), 2010.
- 4) 今井寛樹, 松崎正紀, 高津俊司: 整備新幹線の事後評価(東北新幹線・九州新幹線), 土木計画学・講演集 No.43, CD-ROM(No.352), 2011.
- 5) 北川修三: 軟岩トンネルでの膨張現象と対策工法に関する研究, 京都大学博士論文, 2002.7.23.
- 6) 岡崎準: 膨張性地山におけるトンネル覆工の合理的な設計に関する研究, 京都大学博士論文, 2004.3.23
- 7) 剣持三平: 膨張性泥岩地山におけるトンネルの多重支保工の効果に関する研究, 早稲田大学博士論文, 2007.3.1.
- 8) 木内勉: 自由断面掘削機による軟岩トンネルの高速掘進システムの研究, 東京大学博士論文, 2008.2.21.
- 9) 依田淳一: 第四紀未固結粘性土地山における都市 NATM トンネルの挙動分析と合理的な設計・施工管理手法, 京都大学博士論文, 2008.9.24.
- 10) 海老名清隆: 高速道路と斜角 15 度で交差する新幹線, 土木施工, 2015.2, VOL.56, No.2
- 11) 下津達也, 玉井真一, 跡部拓己: 整備新幹線における馬桁一体 PC 連続桁について, プレストレスとコンクリート工学会第 22 回シンポジウム論文集, 2013.10
- 12) 仁杉巖, 高崎一軽井沢間の新幹線線路の選定にからんで考えたこと, J R E A, 42 巻 1 号, 日本鉄道技術協会, 1999.1
- 13) 北日本新聞, 北陸新幹線風にも負けず, 2015.5.13

(2015.7.31 受付)