

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：31103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560570

研究課題名(和文) 表層品質と環境要因に着目した寒冷地コンクリート構造物の予防維持管理技術

研究課題名(英文) Preventive maintenance for concrete structures from view point of surface layer quality and environmental condition

研究代表者

阿波 稔 (ABA, MINORU)

八戸工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10295959

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：寒冷地におけるコンクリート構造物は、凍結融解作用により表層劣化(スケーリング)を受けやすい環境下にある。さらに、構造物表面におけるスケーリングの発生は、かぶりコンクリートの品質低下を招き、塩害などの複合劣化のリスクを増大させることから、寒冷地域では予防保全型の維持管理が重要となる。本研究では、表層品質と環境要因に着目した寒冷地コンクリート構造物の予防維持管理技術の提案したものであり、以下の項目について検討した。

寒冷地域において老朽化した橋梁の耐久性調査、実構造物の表層品質の調査、表層品質とスケーリング抵抗性の評価、凍結融解と凍結防止剤の複合環境下におけるけい酸塩系表面含浸材の適用

研究成果の概要(英文)：The concrete structures in cold climate is prone to surface deterioration (scaling) by the freezing and thawing action. The scaling of surface layer leads to a decrease in quality of cover concrete, and it will be increased the risk of complex deterioration of structure, such as steel corrosion and so on.

The purpose of this study is to investigate the preventive maintenance for concrete structures from view point of the surface layer quality and the environmental condition. Research items are as follow;

Durability investigation of RC bridge served in cold region, Assessment of the surface layer quality of concrete structures, Evaluation of relationship between the surface layer quality and the de-icing salt scaling of concrete, Application of silicate-based surface penetrant to under the complex environment, such as the freezing-thawing action and the de-icing salt condition.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート 表層品質 耐久性 予防維持管理 表面含浸材 凍結防止剤

1. 研究開始当初の背景

寒冷地におけるコンクリート構造物は凍結融解作用により、特有の凍害を受けやすい環境にある。また、近年、凍結防止剤などの塩化物が存在する環境下では凍結融解との複合作用により劣化が促進され、表層劣化（スケール）が顕在化してきている。さらに劣化が進行した段階では、外部劣化因子からの保護層としてのかぶり（表層部）コンクリートの機能が低下し、内部鉄筋の腐食やアルカリシリカ反応などの複合劣化を誘発するケースが報告されている。そして、複合劣化にともなう構造物の維持管理コストの増大が指摘されている。

一方、土木学会コンクリート標準示方書「維持管理編」では、構造物の維持管理の原則や標準的な手順が示されている。一般に、凍害による劣化進行過程は、凍結融解作用によりスケールが発生するまでの潜伏期、表層部の劣化が進行する進展期・加速期、鋼材腐食が増大する劣化期に区分される(図-1)。凍害に対する構造物の予防維持管理においては、コンクリートの劣化や鉄筋腐食による部材性能の低下が顕著になる以前の潜伏期や進展期における適切な対策が不可欠であり、水分や塩化物の供給状況や凍結融解作用などの環境条件を踏まえた表層部コンクリートの品質や劣化抵抗性の定量的な評価が重要となる。しかしながら、構造物表層のコンクリート品質や環境要因を取り入れた予防維持管理の手法については十分に確立されているとは言えない。特に、スケールに代表されるようなコンクリートの凍害は、冬季期間の温度や水分供給に加えて、凍結防止剤に由来する塩化物の影響を環境要因として考慮しなければならない。そのような現状のもと、塩化物の作用を受ける寒冷地コンクリート構造物の予防維持管理技術の高度化が望まれている。

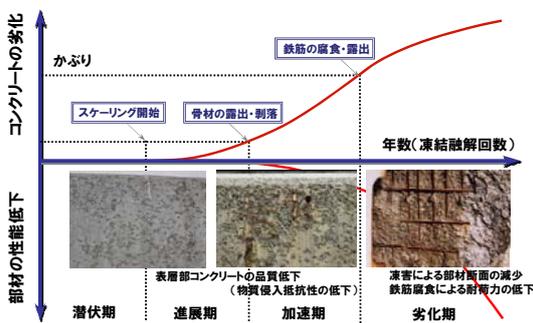


図-1 凍害による劣化進行過程の概念図 (安全性に着目した場合)

2. 研究の目的

本研究は、表層品質と環境要因に着目した寒冷地コンクリート構造物の予防維持管理技術について提案することを目的としたものである。

具体的な研究項目を以下に示す。

- (1) 寒冷地域において老朽化した橋梁の耐久性調査
- (2) 実構造物の表層品質の調査
- (3) 表層品質とスケール抵抗性の評価
- (4) 凍結融解と凍結防止剤の複合環境下におけるけい酸塩系表面含浸材の適用

3. 研究の方法

- (1) 寒冷地域において老朽化した橋梁の耐久性調査

青森県内において 80 年経過し凍害と塩害の複合により老朽化したコンクリート橋梁（法量橋）、および 76 年経過し塩害により老朽化したコンクリート橋梁（根井橋）の詳細調査（各種非破壊試験、トラックによる静的載荷試験、3D スキャナを用いた橋梁の形状計測、コンクリートコアによる耐久性試験等）を実施した(図-1)。さらに、同橋梁より RC 撤去桁を大学に搬入し、曲げ耐荷試験を行い、破壊状況を観察した。



図-2 老朽化した橋梁（法量橋）の詳細調査



図-4 表層透気試験

- (2) 実構造物の表層品質の調査

寒冷地域において冬季および夏季に施工されたコンクリート構造物（橋梁下部工、ボックスカルバート）の表層品質調査を実施した。調査項目は目視評価（外観の変状）、表層透気試験（図-4）、表面吸水試験（図-5）と

した。調査においては、コンクリートの型枠存置期間、型枠脱型後の追加養生（シート等による封緘養生）、使用型枠の種類が表層品質に及ぼす影響について検討した。

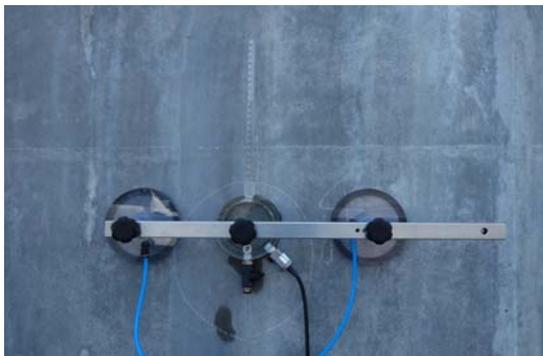


図-5 表面吸水試験

(3) 表層品質とスケーリング抵抗性の評価
土木用 (24-8-25BB), 港湾用 (24-8-40N), 建築用 (24-15-25N) の 3 種類のコンクリート配合を用いて試験体を作製し、表層品質とスケーリング抵抗性との関係を実験的に検討した。コンクリート試験体の寸法は、150×150×530mm とした。実験では、一般型枠と透水型枠を使用し比較した。また、作製した試験体は、材齢 7 日で脱型し、追加養生として水中養生、気中養生、封緘養生（シート養生）、養生剤の 4 ケースを実施した。さらに、追加養生として型枠を材齢 28 日まで存置するケースも行った。そして、材齢 28 日および 77 日にて表層透気試験、材齢 28 日にてスケーリング抵抗性試験を実施した。スケーリング抵抗性試験は、JSCE-K 572 (6.10 スケーリングに対する抵抗性試験) に準拠して実施した。

また、プレストレストコンクリート桁を対象として硬化コンクリートの気泡組織と耐凍害性の調査も実施した。

(4) 凍結融解と凍結防止剤の複合環境下におけるけい酸塩系表面含浸材の適用

コンクリートの表層品質を改善し、予防保全的にスケーリング抵抗性を向上させる目的でけい酸塩系表面含浸材の劣化防止効果について検証した。実験では、9 種類のけい酸塩系表面含浸材（表-1）をコンクリート試験体に塗布し、NaCl 3%の塩分作用下において凍結融解試験を行い、スケーリング抵抗性を評価した。コンクリートの試験体の水セメント比は 55%、目標スランプは 8cm、目標空気量は 5.0%とした。

なお、けい酸塩系表面含浸材は、コンクリート表層部に浸透することにより、コンクリート中の水酸化カルシウムとの反応による C-S-H ゲルの生成ならびに主成分の乾燥固化により、コンクリートの空隙を緻密化することでコンクリート表層部を改質するものである。

表-1 試験に用いたけい酸塩系表面含浸材

記号	主成分	改質メカニズム	副成分
A	けい酸ナトリウム	反応型	
B	けい酸ナトリウム けい酸カリウム	反応型	
C	けい酸ナトリウム	反応型	
D	けい酸ナトリウム けい酸カリウム	反応型	
E	けい酸ナトリウム	反応型	撥水
F	けい酸ナトリウム	反応型	
G	けい酸ナトリウム けい酸カリウム	反応型 固化型	
H	けい酸リチウム	固化型	
T	けい酸ナトリウム	反応型	撥水

4. 研究成果

(1) 寒冷地域において老朽化した橋梁の耐久性調査

①トラック（載荷総重量 20 トン）による静的載荷試験を実施するにあたり、変位計（ダイヤルゲージ）による主桁のたわみ、3D スキャナによる橋梁形状および微動を利用した振動特性の計測を組み合わせることにより、現位置における橋梁の物理的性質（剛性）を総合的に評価できる可能性を示した。

②コンクリートコアの強度試験から、環境作用や荷重作用の影響によって部位・部材の力学的性質（損傷）に差異が認められた。特に、水掛かりに起因する凍害や車両による輪荷重の影響を受けやすい部材において損傷の増大が確認された。また、法量橋（主桁・橋台）においては、凍結防止剤によると考えられる高濃度の塩化物イオンが蓄積されていた。しかしながら、鉄筋の腐食診断の結果、主鉄筋の腐食は端部に配置された鉄筋表面に止まっているため全体としては軽微であった。

③RC 撤去桁の載荷試験により、主鉄筋の重ね継手部のすべりが曲げひび割れの起点となることが認められた（図-6）。これは、使用されている鉄筋が丸鋼であることや凍害によりコンクリートの付着強度が低下したことなどに起因するものと考えられる。

そして、凍害によるコンクリートの劣化と凍結防止剤散布による鉄筋腐食が複合する環境下において、RC はり部材の構造性能を保持するためには、部材断面形状の維持、鉄筋定着の確保、鉄筋腐食の抑制が極めて重要な要因となることが改めて確認された。

以上より、安全性の観点から寒冷地域においてコンクリート構造物の予防維持管理を実現するためには、水分の凍結融解や凍結防止剤の影響を考慮した凍害によるコンクリートの表層劣化（スケーリング）を抑制することが肝要であることが示された。



図-6 主鉄筋の重ね継手部のすべり

(2) 実構造物の表層品質の調査

①表層透気係数と脱型後の追加養生も含めた養生日数との関係を図-7に示す。この図は調査した構造物の中から高炉セメントB種、W/C: 50~55%, 一般型枠の条件のコンクリートの結果をもとに整理したものである。なお、追加養生は封緘養生(型枠存置期間の延長, シート養生)を行っているケースとした。これより脱型後の追加養生も含めた養生日数の増加に伴い表層透気係数も大きく低下する傾向が認められる。特に養生日数が10日以下の構造物では、表層透気係数も増大し部位による変動が大きい。これは型枠脱型にともないコンクリート表面が乾燥し、水和反応の低下や面的な微細ひび割れの発生によって緻密性が低下したものと考えられる。養生日数が14日以上構造物では、表層透気係数が $1 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以下となり品質の面的なバラツキもある一定の範囲に低減される傾向にある。

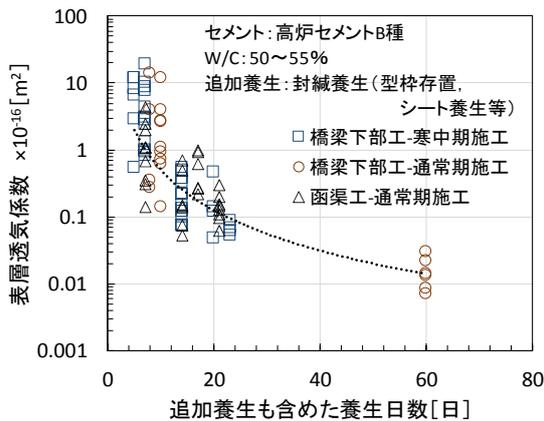


図-7 表層透気係数と養生日数¹⁾

②透水型枠を使用し、さらにシート養生を行うことは、コンクリートの表層透気係数および表面吸水速度を低下させる手法として有効である。特にブリーディングが生じやすい構造物においては、より大きな効果を期待で

きる可能性がある。しかし、一般型枠を使用したコンクリートであっても、シート等により追加養生を行うことによって透水型枠を使用した場合と同等の緻密性の向上が期待できるものと考えられる。

以上より、型枠存置期間の延長や脱型後にシート等を用いて追加養生を行うことは、コンクリート表面の急激な温度変化や乾燥を低減し、面的な微細ひび割れの抑制および表層部コンクリートの緻密性の向上が期待できる。

(3) 表層品質とスケーリング抵抗性の評価

①表層透気係数とスケーリング量の関係を図-8に示す。この結果より、材齢28日では試験体によって表面含水率のバラツキが大きく、表層透気係数の変動も大きい。一方、材齢77日では、試験体の表面含水率が3~4%と安定し、表層透気係数の増加にともないスケーリング量も増大する傾向が確認される。特に、高炉セメントB種を用いたコンクリートでは、表層透気係数に対してスケーリング抵抗性がより敏感に影響することが認められる。このことから、コンクリートの表層品質が凍結融解と塩化物が複合して作用する環境下におけるスケーリング抵抗性と密接に関係しているものと推察される。また、維持管理段階においてコンクリートの表層品質をモニタリングすることにより、スケーリング抵抗性が評価できる可能性が示唆される。

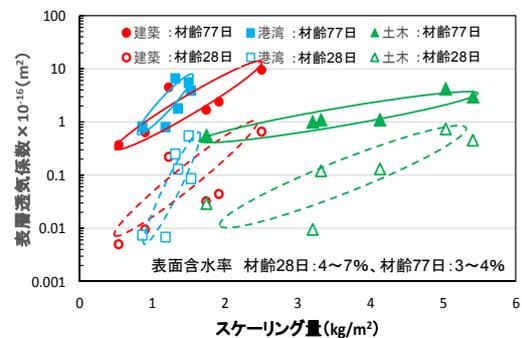


図-8 表層透気係数とスケーリング量の関係

②実構造物においてコンクリートの目標空気量を増加させることは、製造工場ごとの気泡組織の変動を考慮して、安全側で空気量と質を確保するための一つの方策として有効であることを示した。

(4) 凍結融解と凍結防止剤の複合環境下におけるけい酸塩系表面含浸材の適用

①けい酸塩系表面含浸材を塗布したコンクリートの塩分環境下におけるスケーリング試験結果を図-9に示す。その結果より、使用した何れの含浸材も無塗布のコンクリート

と比較してスケーリングを抑制する傾向にあるが、含浸材の種類によってその効果は大きく異なることが確認できる。含浸材の主成分が、けい酸リチウムとけい酸ナトリウムの混合（緑）>けい酸リチウムあるいはけい酸ナトリウムの単独（青）>けい酸ナトリウム+撥水効果（赤）の順でスケーリング量が減少することが分かる。特に副成分として撥水効果を有する含浸材FおよびTは、スケーリングの発生はほとんど認められなかった。さらに、含浸材FおよびTは、他の材料と比べてコンクリートの表層強度を増大させる特徴があり、このこともスケーリング抑制効果が大きい一因と考えられる。

以上より、けい酸塩系表面含浸材を適切に活用することにより、寒冷地域においても予防保全的にコンクリート構造物の劣化防止が期待できることが確認された。その場合、表面含浸材を施工したコンクリートの撥水性や表層強度の向上を指標として材料選定を行うことが肝要となる。

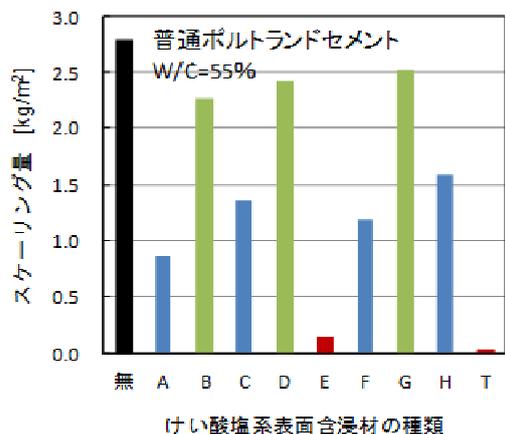


図-9 塩分環境下におけるスケーリング試験結果²⁾

<引用文献>

- 1) 阿波 稔, 迫井裕樹, 金濱巨晃, 音道 薫, 函渠工・橋梁下部工におけるコンクリート構造物の品質確保の取組とその検証, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 38, No. 1, 2016 (印刷中)
- 2) 阿波 稔, 積雪寒冷地域におけるコンクリート構造物への表面含浸工法の適用, 建設技術センターだより, pp. 1-3, (公財) 青森県建設技術センター, 2014

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① 権代由範, 月永洋一, 阿波 稔, 迫井裕樹, 吸引鐘を用いたコンクリートの簡易透気試験法に関する基礎的検討とスケーリング抵抗性評価への適用の試み, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第 77 巻, 第 678 号, pp. 1193-1202, 2012

- ② 佐藤陽貴, 月永洋一, 阿波 稔, 迫井裕樹, 権代由範, 非破壊試験によるコンクリート表層部脆弱層の評価に関する研究, シンポジウム: コンクリート構造物の非破壊検査論文集, 査読有, Vol. 4, pp. 441-446, 2012

- ③ 長谷川 明, 阿波 稔, 上原子 晶久, 佐々木 正昭, 青森県の橋梁長寿命化への取組, プレストレストコンクリート, 査読無, Vol. 55, No. 6, pp. 18-23, 2013

- ④ 迫井裕樹, 阿波 稔, 月永洋一, コンクリートの塩化物イオン浸透性及び受ける融解条件の影響, コンクリート工学論文集, 査読有, Vol. 36, No. 1, pp. 1036-1041, 2014

- ⑤ 北野勇一, 池田正行, 岩城一郎, 阿波 稔, プレキャスト PC 桁における空気量と耐凍害性に関する調査, 第 23 回 プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, 査読有, pp. 627-632, 2014

- ⑥ 阿波 稔, 迫井裕樹, 長谷川明, 「青い森の橋ネットワーク」の活動状況—青森県内のコンクリート構造物の長寿命化と品質確保に向けて—, コンクリートテクノ, 査読無, Vol. 33, No. 4, pp. 9-15, 2014

- ⑦ 川邊清伸, 阿波 稔, 迫井裕樹, 須藤昌二, 大森祐一, 寒中コンクリート用施工状況把握チェックシートを活用したコンクリート構造物の品質確保の取組, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 37, No. 1, pp. 1285-1290, 2015

- ⑧ Y. SAKOI, M. ABA and Y. TSUKINAGA, Chloride Ion Penetration into Concrete Applied Surface Penetrant under Freezing-Thawing Condition, Proceedings of the Fifth International Conference on Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, (USB-Memory), 査読無, 2015

- ⑨ 北野勇一, 池田正行, 岩城一郎, 阿波 稔, プレキャスト PC 桁における空気量と耐凍害性および塩分浸透性に関する調査, プレストレストコンクリート, 査読無, Vol. 57, No. 2, pp. 86-91, 2015

- ⑩ 細田 暁, 二宮 純, 森岡弘道, 阿波 稔, 田村隆弘, 施工状況把握チェックシートによるコンクリート構造物の品質確保と協働関係の構築, コンクリートテクノ, 査読無, Vol. 34, No. 5, pp. 63-82, 2015

- ⑪ 阿波 稔, 迫井裕樹, 金濱巨晃, 音道 薫, 函渠工・橋梁下部工におけるコンクリート構造物の品質確保の取組とその検証, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 38, No. 1, 2016 (印刷中)

- ⑫ 高橋 雅, 佐伯岳洋, 小穴 信太郎, 阿波 稔, 橋梁下部工におけるコンクリート構造物品質確保への取組み, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 38, No. 1, 2016 (印刷中)

[学会発表] (計 14 件)

- ① K. Watanabe, Y. Sakoi, M. ABA, A. Kamiharako, Y. Tsukinaga, DURABILITY

INVESTIGATION OF RC BRIDGE AFTER 56 YEARS,
37th Conference on Our World in Concrete
& Structures, Vol.31, pp.443-447, 2012

②市川達朗, 渡邊浩平, 迫井裕樹, 阿波 稔,
上原子晶久, 建造後 55 年を経過した RC 橋の
耐久性調査, 土木学会 第 67 回年次学塾講
演概要集, V-052, 2012

③渡邊浩平, 市川達朗, 迫井裕樹, 阿波 稔,
月永洋一, 凍結融解を受けた鉄筋コンクリ
ートの付着強度特性, 土木学会 第 67 回年次
学塾講演概要集, V-191, 2012

④市川達朗, 迫井裕樹, 阿波 稔, 月永洋一,
建造後 80 年を経過した実橋梁の耐久性調査,
土木学会 第 68 回年次学術講演会, V-538,
2013

⑤渡邊浩平, 市川達朗, 阿波 稔, 迫井裕樹,
複合劣化を受けた RC 部材の力学的特性に関
する実験的研究, 平成 24 年度土木学会東北
支部技術研究発表会講演概要集, V-3, 2013

⑥猪股宣紀, 渡邊浩平, 市川達朗, 迫井裕樹,
阿波 稔, 表面改質材を用いたコンクリ
ートの物質移動抵抗性とスケーリング抵抗性, 平
成 24 年度土木学会東北支部技術研究発表会
講演概要集, V-19, 2013

⑦阿波 稔, 積雪寒冷地域におけるコンクリ
ート構造物への表面含浸工法の適用, 建設技
術センターだより, pp.1-3, (公財) 青森県
建設技術センター, 2014

⑧後藤忠平, 月永洋一, 阿波 稔, 迫井裕樹,
権代由範, コンクリート表層部の脆弱層の品
質に関する研究, 日本建築学会大会学術講演
梗概集 (近畿), A-1 材料施工, pp.377-378,
2014

⑨後藤忠平, 月永洋一, 阿波 稔, 迫井裕樹,
権代由範, コンクリート表層部脆弱層の非破
壊試験による評価, 日本非破壊協会鉄筋コン
クリート構造物の非破壊試験部門ミニシ
ンポジウム講演論文集, pp.25-28, 2014

⑩M. Aba, Y. Sakoi, Y. Tsukinaga, Y. Gondai,
Study on the quality of fragile surface
layer of concrete by the thickness of
member section, Fourth International
Symposium on Life-Cycle Civil Engineering,
2014

⑪川邊清伸, 阿波 稔, 迫井裕樹, 須藤昌二,
大森祐一, 寒中コンクリートを対象とした品
質確保の取組, 土木学会全国大会年次学術講
演会, V-042, 2015

⑫工藤慧, 迫井裕樹, 月永洋一, 阿波 稔,
コンクリートの吸水率および中性化に及ぼ
すけい酸塩系表面含浸材の養生効果, 日本建
築学会大会学術講演会梗概集, pp.729-730,
2015

⑬川邊清伸, 阿波 稔, 迫井裕樹, 高山周治,
コンクリートの表層品質に着目した養生効
果の検討, 平成 27 年度土木学会東北支部技
術研究発表会講演概要集, VI-27, 2016

⑭伊藤大地, 阿波 稔, 迫井裕樹, 川邊清伸,
音道 薫, 透水型枠を用いたコンクリート構
造物の表層品質に関する一検, 平成 27 年度

土木学会東北支部技術研究発表会講演概要
集, VI-26, 2016

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿波 稔 (ABA MINORU)

八戸工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号 : 1 0 2 9 5 9 5 9

(2) 研究分担者

月永洋一 (TSUKINAGA YOICHI)

八戸工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号 : 6 0 1 2 4 8 9 8

迫井裕樹 (YUKI SAKOI)

八戸工業大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号 : 3 0 4 5 3 2 9 4