

博士學位論文

(論文内容の要旨及び論文審査の要旨)

第12号

平成29年7月

八戸工業大学

は し が き

博士の学位を授与したので、学位規則（昭和28年文部省令第9号）
第8条の規程に基づき、その論文の内容の要旨及び論文審査の結果の
要旨をここに公表する。

目 次

論文博士

学位記番号	博士の 専攻分野の 名称	氏 名	論 文 題 名	頁
第 9 号	博士（工学）	細川 吉晴	<small>なま</small> 生火山灰を活用した保水性インターロッキングブロックの開発 とその温度上昇抑制機能に関する研究 (Studies on development of water-retentive interlocking block (WR-ILB) mixed with fresh volcanic ashes, and on function of temperature-rise-restraint of surface of WR-ILB paving road)	1

氏名	細川 吉晴
博士の専攻分野の名称	博士 (工学)
学位記番号	第9号
学位授与年月日	平成29年7月3日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	<p>なま 生火山灰を活用した保水性インターロッキングブロックの開発とその温度上昇抑制機能に関する研究 (Studies on development of water-retentive interlocking block (WR-ILB) mixed with fresh volcanic ashes, and on function of temperature-rise-restraint of surface of WR-ILB paving road)</p>
論文審査委員	<p>(主査) 八戸工業大学教授 阿波 稔 (副査) 八戸工業大学教授 竹内 貴弘 (副査) 八戸工業大学教授 月永 洋一 (副査) 八戸工業高等専門学校名誉教授 菅原 隆</p>

論文の内容の要旨

最近噴火した新燃岳の火山灰と時々噴火している桜島の火山灰のコンクリート用細骨材への適用性について、物理的・化学的性質の試験や採取地の現地調査などから検討した。前者は、採取地により吸水率が4~7%、表乾密度が2.1~2.3g/cm³、粗粒率が2.0~3.2の範囲で土木学会の細骨材の標準粒度範囲に入るものは少なかった。高吸水率な生火山灰を混練したモルタルは保水性を高めることが示唆された。化学的性質のpHは当初、火山灰中のSO₂ガスによって4.60程度で強酸性を呈したが、1年1か月の室内保存後には中性に近づき、また3年半経過の堆積火山灰層のSO₂ガス濃度を検知できなかった。生火山灰の使用に当たり、暴露期間が短いのでSO₂ガス残留が皆無とは言い切れない以上、鉄筋コンクリートよりは保水機能を持たせた無筋コンクリート製品への活用が無難に思われた。製品試験に用いるため、粗粒率2.15~2.27の採取地に近い堆積地から粗粒率2.20と吸水率7.60%の新燃岳火山灰(T)を多量に採取した。一方、後者の桜島火山灰(S)は、0.6mmふるいをほとんど通過するほど微細で粗粒率が0.61、吸水率が0.93%、表乾密度が2.67g/cm³の性質であった。生火山灰の化学成分は両者とも56%のシリカ、17%のアルミナを主体としており、天然ポゾラン材といえる。X線回折の分析の結果、両者にアルカリ骨材反応(ASR)物質が確認されたので、ASR試験(モルタルバー法)を実施し26週目の膨張率がJIS基準0.100%より低く“無害”と判定された。以上のことから、両者はコンクリート用細骨材のJIS規格を満足するものではないが、良質な細骨材との併用により保水機能を有する無筋コンクリート製品への適用が妥当と考えられた。

次に、高吸水性のTに着目し保水性インターロッキングブロック(以下、保水性ILBという)を開発するため、比較としてSも使い、生火山灰の単体および両者の混合による配合設計で各種保水性ILBをJIS認定ブロック工場で製造しJIS試験(他に透水試験も)を実施した。堆積灰の減容促進を考慮した最大火山灰混入率(細骨材量置換割合)の特定と、製品性能としてJIS規格を満足する点で配合を検討した。保水性ILBのJIS規格は、ヒートアイランド現象緩和に寄与す

るとして2010年3月に制定されたばかりで、 3.0 N/mm^2 以上の曲げ強度（歩道用）、 0.15g/cm^3 以上の保水量、70%以上の吸上げ高さが要求される。単体配合の試験結果、JIS規格をすべて満足する火山灰混入率（vol.）の最大はTが30%、Sが20%であった。ILB粉末の重金属溶出試験から基準値を越すものはなかった。また、火山灰のT・S混合配合では、T:S容積比3:7、5:5、7:3の混合で火山灰混入率（vol.）を20、30、40%、および、火山灰無混入の10配合で保水性ILBを製造した。曲げ強度のJIS規格を満足したのは、火山灰混入率20%では3:7、5:5、7:3が、同じく30%と40%では5:5と7:3の配合であった。全ての配合が保水量と吸上げ高さのJIS規格を満足した。混入率30・40%でSの多い配合は保水量を若干高めた。以上のことから、堆積灰減容や保水量、安全側な混入率を考慮すると火山灰混入率30%の5:5混合が最適な配合であり、生火山灰を活用する保水性ILBを開発することができた。

また、保水性ILBでも火山灰混入を保水性ILB（灰）、火山灰無混入を保水性ILB（無）というが、この両者に加え、普通ILB、芝生およびアスファルト舗装（As）の5種類の資材で施工した試験歩道において、2013年7月下旬～8月初旬の暑熱期に、資材の歩道温度上昇抑制機能を比較する温度測定試験をおこなった。各資材区 1 m^2 の中央部で高さ100、50、20、0（表面）、-3cm（内部）の温度を測定した結果、高さ20～100cmではいずれの資材区でも外気温と大差ない温度変化を示し、表面と内部では温度の高い順にAs>普通ILB>保水性ILB（無）≒保水性ILB（灰）>芝生となった。保水性ILB（灰）の温度上昇抑制効果は保水性ILB（無）よりも認められたが、その差は小さかった。その小さな温度差の原因把握のためILB切片で実験した結果、1) 保水性ILB（灰）の表面温度は保水性ILB（無）より最大 1°C 下げた、2) ILB表面を強制的に温めると保水性ILB（灰）と保水性ILB（無）の表面が温度上昇し始め、保水性ILB（灰）の目地も遅れて徐々に温度上昇したことから、目地が温度上昇抑制に影響することが示唆された、3) 保水量の高い保水性ILB（灰）は、保水性ILB（無）より保水性能が認められた、4) ILB表面に平行に切断した三層の単位容積質量は表層ほど若干重い傾向を示し、ILB製造工程で密実に締固められる中でも表層ほど緻密に形成されていた、5) 保水性ILB（灰）の表面から水を浸透させると保水性ILB（無）より浸透が遅かった。よって、保水性ILB（灰）は微細なSの混入で保水量を高めるが、より緻密な表層からの水分蒸発が抑制され、ブロック舗装では目地が温度低減に寄与することが示唆された。

保水性ILB（灰）の歩道温度上昇抑制機能のメカニズムは、微細火山灰Sを混入したことでブロックの表層がより緻密に製造工程で形成されたため、内部の保水の表層への毛細管現象が抑制されブロック表面からの水分蒸発が抑制されることと、そのために内部の保水がブロック側方に回り自由面である目地を介しての水分蒸発や目地砂からの水分蒸発が生じることから、歩道表面温度は目地がブロック表面より低く発現することが示唆された。これは、夕方に撮影した熱画像から目地の温度がブロック表面より $0.4\sim 1.3^\circ\text{C}$ 低く推移したことから裏付けられる。舗装面の温度上昇抑制に目地が大きな役割を果たすので、測定面の円直径と高さが同一な簡易放射温度計で目地を含めて舗装面温度を測定する方法を、ヒートアイランド現象緩和効果を評価する方法として新規に提案した。この方法は、今までのILB1個の表面や供試体、 $\phi 100\text{mm}$ コアを用いる室内照射試験よりも現場的に実用性がある。実際に3色普通ILB（宮崎市）と2色保水性ILB（東

京都) の歩道でブロック舗装面温度を測定した結果、歩道の目地の温度がブロック表面より有意に低く発現した ($P<0.05$ および $P<0.01$) . このことは、保水性 ILB 歩道の温度上昇抑制メカニズムを解明するとともに、熱画像で目地の温度が低く表示した結果を再現するものであり、目地を含む舗装面の平均温度で温度上昇抑制 (低減) 効果を評価する方法が自然で実用的で妥当性があることを実証した. この簡易放射温度計は廉価であるが、舗装面温度を容易に迅速に測定できることを確認した.

最後に、最近多発する火山噴火を鑑み、生火山灰を活用する対策として、汎用性のある火山灰等混入型の保水性 ILB 製造技術を構築した. これは、生火山灰や古来の堆積火山灰 (シラス) を細骨材の一部として、あるいは、凝灰岩粉末を混和材料として火山噴火地域で調達できる前提で、火山灰等混入の積ブロックや環境製品を防災現場に備蓄する公共事業などに優先して供するフローも含め、火山灰等活用メニューとして提案した.

ABSTRACT

The applicability to concrete fine aggregate of the volcanic ashes, i.e. the ash from Mt. Shinmoedake erupted recently and one from Mt. Sakurajima erupted sometimes, was studied by the physical and chemical tests and the investigation in ash-falling sites. The former ash, sampled from wide ash-falling sites, had physical properties of 4-7% absorption, 2.1-2.3 g/cm³ density in saturated surface-dry condition, and 2.0-3.2 fine modulus occupied with smaller particles in a range of JSCE standard fine aggregate grading. Mortar specimen mixed with high-absorption ash tended to raise their water retention. As the chemical properties, firstly ash's pH was about 4.60, strong acid, due to SO₂ volcanic gas, and secondary the ash, being packed in plastic bag for one year and one month, changed from the acid side to near the neutrality one, and then the density of SO₂ volcanic gas could not detect in the ash layer for 3.5 years. As it could not deny residual possibility of a very small amount of SO₂ gas inside fresh ash, mixing fresh ash into reinforced concrete could be difficult. Shinmoedake ash (T) was newly prepared large quantity for concrete product examinations from the sedimentation place of volcanic ash as indicating 2.15-2.27 fine modulus. On the other hand, Sakurajima ash (S) was very fine with 0.61 fine modulus, 0.93% absorption and 2.67 g/cm³ density in saturated surface-dry condition.

Chemical compositions of T and S were composed by both 56% SiO₂ and 17% Al₂O₃ mainly, being natural pozzolan material. Both ashes were judged to be harmless from the ASR test's results indicating be less than 0.100% of JIS 26-week-mortar-bar expansion standard, although containing ASR properties in both ashes by a XRD analyzing. Therefore, both ashes were confirmed to be able to utilize into precast unreinforced concrete products as fine aggregate by mixing with high quality fine aggregate, although both ashes were not satisfied JIS standard for fine aggregate of concrete.

Water-retentive interlocking block (WR-ILB) must be satisfied the bending strength (for sidewalk block): more than 3.0 N/mm², the capacity of water-retention: more than 0.15g/cm³ and the height absorbed water: more than 70%, as JIS standard for WR-ILB, being just established in March, 2010 to contribute to heat island effect relaxation. The JIS authorization factory plant of concrete block produced WR-ILB without volcanic ash and WR-ILB with each T and S of 10, 20, 30, 50% (vol.), being fine aggregate replacement ratio. All WR-ILB was experimented on the above three tests adding the water permeability test. As the results, the maximum mixing volume rate was 30% for T and 20% for S to be satisfied JIS standard for WR-ILB. Mixing with very fine S a lot into concrete could increase water retention but extremely reduce a water permeability. The heavy metal leaching test for the grain of each piece of WR-ILB, mixed with 50% T and S, were not found numerical values to exceed its standard values.

Then, the concrete block plant produced 10 types of WR-ILB, which was mixed without volcanic ash and with 9 combined ash of 3-volume ratio blended with T of S, i.e. 3:7, 5:5 and 7:3, and 3-mixing-volume rate of 20, 30 and 40% being a fine aggregate replacement ratio. The maximum mixing volume rate of volcanic ashes for WR-ILB was clearly recommended 30% with 5:5 of T:S volume ratio blending both ashes, while thinking about reduction of volcanic ash accumulation volume, keeping JIS standard for WR-ILB, and keeping more water retention. Therefore, WR-ILB with most suitable concrete mix proportion to utilize fresh volcanic ash was developed.

The field test was done to measure temperature comparing the function of temperature- rise-restraint of surface in

a test sidewalk composed with 5 materials, i.e. two types of WR-ILB (Ash-WR-ILB and No-Ash-WR-ILB mixed with and without volcanic ashes), normal ILB, loan and asphalt road, in the summer heat period from last of July to first of August in 2013. The changes of temperature in 20, 50, and 100cm heights above each test sidewalk surfaces was almost same as the change of the outside temperature. The higher temperature on surface and in 3cm-depth indicated as the order of asphalt road, normal ILB, No-Ash-WR-ILB, Ash-WR-ILB and loan. An effect of temperature-rise-restraint of Ash-WR-ILB was, however, recognized with a small different of temperature than No-Ash-WR-ILB.

Using ILB graft to make clear the reason of its small different of temperature between both WR-ILB, several tests were done, and their results were shown below; 1) Ash-WR-ILB could reduce 1.0 degree Celsius centigrade ($^{\circ}\text{C}$) than No-Ash-WR-ILB. 2) When warming the surfaces of WR-ILB forcibly, the surface temperature of both WR-ILB increased gradually and then after warming the neighbor ILB graft, the joint of Ash-WR-ILB was warmed to increase its temperature. The joint could be influenced to temperature-rise-restraint effectively. 3) Ash-WR-ILB had a higher water retention because its quantity of evaporation was smaller than No-Ash-WR-ILB. 4) Unit weight of upper layer of ILB tended slightly heavy, and it indicated the upper layer of ILB is surely formed minute organization by producing ILB. 5) When infiltrating water into the surface of ILB, Ash-WR-ILB was infiltrated slowly than No-Ash-WR-ILB. Therefore, it is suggested that Ash-WR-ILB increase water retention by very fine S but a restrain evaporation and/or vaporization from upper layer forming by minute organization, and the joint contributed to a temperature reduction effect in ILB paving road.

Based upon the foregoing, on the function of temperature-rise-restraint of Ash-WR-ILB sidewalk, an original mechanism was elucidated as capillary phenomenon and water evaporation, from inside to upper layer and then from upper layer to surface, were restrained by forming minute organization in upper layer of Ash-WR-ILB, and as then inside water of ILB move to flank and neighborhood and then evaporate from the joint, being a free face for ILB. Thus was supported the joint contribution for a temperature reduction effect because the joint's temperature was remarkably low by 0.4-1.3 $^{\circ}\text{C}$ than the ILB surface one in thermograph figures of sidewalk ILB.

Accordingly the joint contribute to a temperature reduction effect, and it must evaluate a heat island effect relaxation by measuring the surface temperature including joints in ILB paving road. At present, a temperature reduction effect in ILB paving road is evaluated by an indoor irradiation examination measuring method (the indoor method) in center point of surface of one ILB, a plate block with 30 \times 30 \times 5cm size, and ϕ 100mm-block core. Instead of that method, the author suggested newly the method of measuring temperature by using a low price radiation thermometer, as a temperature measuring tool with light weight, small size and simple working. Using a radiation thermometer is the merit that anyone can easily and quickly measure temperature of circle of a diameter same as a height from paving surface in ILB paving road, and it is easy to be understood as a method to compare the paving surface temperature on the site. After measuring temperatures of about 60-cm-diameter-circle surfaces (the mean temperature), ILB surfaces and joints in one sidewalk with 3-color-normal ILB in Miyazaki and in two sidewalks with 2-color-WR-ILB in Tokyo, temperatures of joints were significantly low than ILB surface temperatures ($P<0.05$ and $P<0.01$), and the mean temperature indicated effectively sidewalk surface temperature rather than ILB surface one. These results showed clearly to elucidate the mechanism of temperature-rise-restraint of WR-ILB

sidewalk and also to reproduce indicating low temperatures of the joints in the thermograph figures of surface on sidewalk paved ILB. Furthermore, measuring the mean temperature including the joint temperature on ILB sidewalk was reasonable naturally and practically to evaluate a temperature reduction effect rather than the indoor method.

Finally, in view of a volcanic eruption to occur frequently these days, as countermeasure to utilize fresh volcanic ashes, WR-ILB production technologies were built as a volcanic ashes mixture type with the versatility. On the premise that can recruit fresh volcanic ashes, sediment old volcanic ashes (for example, Shirasu) as a fine aggregate, powder from tuff repository as a pozzolan, near a volcanic eruption area, the menu utilizing fresh volcanic ash was suggested for public works projects to store concrete blocks and environmental product mixed with volcanic ashes in the disaster prevention spot, including the flow to take first priority.

論文の審査結果の要旨

2011年1月下旬に爆発的に噴火した新燃岳の火山灰は、周辺地域に多大な被害をもたらした。この比較的新しい火山灰（生火山灰）の多くは、市町村で定めた仮置き場や処分場所で保管・管理されている。これまで堆積灰の一部が瓦やレンガ等へ対処療法的に利用されているのが現状であり、さらなる有効利用の観点から科学的な検証に基づいた減容対策の構築が喫緊の課題となっている。一方、火山噴出物をコンクリート材料として有効活用するための研究は少なくない。しかし、そのほとんどは古来の火山噴出物堆積岩の凝灰岩や火砕流堆積物を対象としたものであり、堆積時期の新しい生火山灰を取り上げた研究は見当たらない。

本研究は、最近噴火した新燃岳の火山灰と時々噴火している桜島の火山灰をコンクリート用細骨材として適用することを目的とし、物理的・化学的性質の試験や採取地の現地調査等から包括的に検討しものであり、8章で構成されている。

第1章は、緒論として研究の背景、火山噴出物の有効活用に関する既往研究、環境製品の保水性インターロッキングブロック（ILB）の特徴、研究の特色と学術的・社会的重要性、本研究の目的および構成について述べている。

第2章は、新燃岳火山灰の物理的性質、モルタル性状、化学特性についての実験および現地調査を通じて火山灰活用における問題点を抽出するとともに、コンクリート用細骨材への適用可能性を示している。

第3章は、新燃岳火山灰および比較のための桜島火山灰を、保水性ILBの細骨材の容積に対して10、20、30、50%の割合で置換し、保水性ILBのJIS規格を満足する最適な配合を実験によって特定した。

第4章は、新燃岳火山灰は吸水率が高くILBの保水性向上が認められること、また微細な桜島火山灰も同様に保水性向上が期待できることから、これらを混合使用した保水性ILBの保水性や吸水性を検討している。さらに、保水性ILBの透水係数の測定よりJIS規格を満足する配合条件を実験的に明らかにし、生火山灰を活用した保水性ILBを開発した。

第5章は、第4章で検討した火山灰混入の保水性ILBと、火山灰無混入の保水性ILB、普通ILB、アスファルト舗装および芝生の5種類の材料を用いて実施した歩道の試験施工について述べている。そして、暑熱時における歩道温度の変化を計測し、保水性ILBが温度上昇抑制に寄与する効果を検証した。その結果、火山灰混入の保水性ILBは火山灰無混入の保水性ILBと比較し、温度上昇抑制効果は確認されるものの、その差異は小さいことを論考した。

第6章は、第5章での検証実験の結果を踏まえ、第4章で示した同配合の保水性ILBを利用した各種の実験から、保水性ILBの歩道温度上昇抑制メカニズムを解明している。ここでは、ブロック単体による温度低減評価法ではなく、ブロック間の目地も含めた舗装面の温度の簡易な測定による評価法を新たに提案し、その妥当性を実証した。

第7章は、最近頻発する火山噴火を鑑み、汎用性のある火山灰混入型の保水性ILBの製造技術を提示し、火山噴火地域での火山灰の有効活用メニューとして整理した。

第8章では、本研究で得られた成果を総括し、今後の展望について論じた。

以上、本研究により得られた成果は、比較的新しい火山灰（生火山灰）を保水性 **ILB** へ有効利用するための道筋を示すとともに、歩道におけるその温度上昇抑制メカニズムを明らかにしたものであり、実用的価値は極めて高い。

よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

最終試験の結果の要旨

事前審査、予備審査および最終試験において、学位論文の内容、コンクリート工学、建設工学、外国語および研究実績に関して口頭試問を行った結果、十分な学力があると認められた。

対外発表としては、査読論文 23 編（内、第一著者 22 編、英文 12 編）、口頭発表等 54 編がある。また、（公社）土木学会東北支部より技術開発賞、国際会議における論文賞も受賞している。これらの研究実績等からも関連専門分野における高い能力および英語の読解力・会話力における学力があると認められた。

以上より、関連専門科目および外国語に関して十分な学力があると認められる。