

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289185

研究課題名(和文)火災で損傷したコンクリートの修復技術の開発

研究課題名(英文)Development of Repairing Technology of Concrete Exposed to Fire

研究代表者

李 柱国(Li, Zhuguo)

山口大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：50432737

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では火災を受けたコンクリートの性能回復挙動およびその影響要因を明らかにし、修復技術の開発を目指して、(1)高温加熱を受けたコンクリートの圧縮強度、静弾性係数、付着強度、耐凍害性および体積変化などの各種性能の再養生による回復程度を詳細に考察し、性能回復に及ぼす加熱前の強度、加熱温度、冷却方法、再養生方法および再養生期間などの要因の影響を明らかにした。(2)受熱したコンクリートの受熱直後と再養生後の化学組成および構造の変化を考察し、その性能回復のメカニズムを解明した。(3)十分な可使時間および強度を有し、無収縮である非セメント系の無機補修材料を開発し、適切な注入工法を検討した。

研究成果の概要(英文)：Firstly we investigated the changes of various properties of fire-damaged concrete after re-curing, including compressive strength, Young modulus, bond strength, freezing and thawing resistance, mass, and volume, etc., and clarified the effects of strength levels before heated, heating temperatures, cooling methods, re-curing methods, and re-curing duration on the property recovery degrees. Furthermore, we examined the hydrates ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, CSH), pore volume and size, inside and surface cracks of fire-damaged concrete right after heated and after re-cured, to clear the mechanism of property recovery. Moreover, a new repairing material was developed for fire-damaged concrete, which is mainly made of wastes such as fly ash and molten slag of municipal waste incineration residue, following the developments of setting retarder and drying shrinkage reducers.

研究分野：建築材料

キーワード：コンクリート 火災 性能回復 補修 力学性能 耐久性

1. 研究開始当初の背景

コンクリートは、火熱を受けると、成分変質と膨張が発生するため、その内部組織が破壊され、多くのひび割れが発生する。そのため、力学性能と耐久性が低下し、鉄筋コンクリート構造物の安全性と耐久性が著しく損なわれる。したがって、日本建築学会は、火災後の鉄筋コンクリート構造物については、激しく劣化した部分(受熱温度が 500 を超えた箇所と火災後の強度が設計基準強度を下回った箇所)をはつりとして打ち直し、それ以外の部分にはひび割れ補修や防錆処理を施すと規定している。コンクリートの打ち直しは、手間と時間がかかるため、簡便・確実な修復技術の開発が重要な課題である。

一方、受熱したコンクリートは、高温で分解したセメントの水和生成物が散水養生や湿潤な環境で再水和するが、圧縮強度とヤング係数の回復程度がコンクリートの使用材料、強度レベル、加熱温度、加熱後の冷却方法および再養生方法・時間などによって異なり、高温前の性能と状態にまでは自然に回復できない。性能の回復促進技術の開発は求められている。また、受熱したコンクリートの性能回復については、多くの実験的考察が報告されているが、それらのほとんどは圧縮強度と静弾性係数の回復を論じるものである。他の性能、特に耐久性についての考察は殆どない。火災後の耐久性とその回復挙動を解明するのは極めて重要な課題である。

分解したセメントの水和生成物の再生成に伴って、ひび割れが逆に増加・拡大する現象は報告されている。再水和してもひび割れが修復されないのは、コンクリートの性能が完全には自然回復できない原因の一つであると考えられる。しかし、ひび割れの発生位置は内部にも表面にもあり、ランダムであるため、通常のひび割れ補修方法が適用できない。また、現在、コンクリートのひび割れの補修工法としては、エポキシ樹脂注入法が主流である。有機材料の注入によってコンクリートの強度および弾性係数などの性能においては同質性が損害され、有機材料の劣化によって耐久性上の問題もある。一方、セメント系無機系注入材料を使用する場合は、ブリーディングによって接着一体性が十分ではなく、補修対象の吸水により練混ぜ水を失うため、若材齢時に強度の増進が停滞し、設計強度に達しない場合がある。火災後のコンクリートの再水和反応は水を消費するため、セメント系無機補修材の適用には疑問が残る。したがって、非セメント系の無機補修材料の開発は急務な課題である。

2. 研究の目的

上記の研究背景を踏まえて、本研究では、火災の高温加熱を受けたコンクリートの性能回復挙動およびその影響要因を明らかにし、修復技術の開発を目的としている。(1) 高温加熱を受けたコンクリートの圧縮強度、付着

強度、凍結融解抵抗性および体積変化なども含めた各種の力学性能と耐久性の再養生による回復程度と速度を詳細に考察し、性能回復の影響要因を明らかにする。(2) 受熱したコンクリートの受熱直後および再養生後の化合物および内部構造の変化およびその影響要因を考察し、その性能回復のメカニズムを解明する。(3) 十分な可使時間および浸透性を有する非セメント系の無機補修材料を開発し、適切な注入工法を検討した上、受熱したコンクリートの性能回復促進と補修を行い、補修効果を検証し、適用範囲を明らかにする。

3. 研究の方法

上記の研究目標を達成するために、本研究では、3種類のコンクリート(普通コンクリート、高強度コンクリート、高強度繊維コンクリート)を練り混ぜて、圧縮強度、長さ変化、動弾性係数、超音波速度、凍結融解抵抗性の試験体を作製した。28日標準水中養生後に、300~500の加熱を行った。加熱速度10/分とし、目標温度の維持時間は2.5時間であった。加熱直後に冷却して上記の各種性能を測定した。冷却方法は、空気中自然冷却と水中急冷却があった。また、他の加熱を受けた試験体を養生して、所定の養生材齢に性能を測定した。再養生方法は、空気中養生、水中養生および表面湿潤養生に分けられた。再養生期間を1ヶ月から8ヶ月までにした。これらの実験で加熱を受けたコンクリートの性能低下および再養生による性能回復挙動を考察にした。

また、水セメント比が異なり、高強度や普通強度セメントペースト、モルタル試験体を作製して、上記の方法で加熱、冷却および再養生方法を行った。光学顕微鏡を用いて、加熱後および再養生後の内部と表面のひび割れを観察した。また、加熱前、加熱直後および再養生後のセメント硬化体の水和反応生成物の変化をX線回折分析(XRD)と示差熱・熱重量同時測定(TG-DTA)によって定量的に考察した。なお、加熱前、加熱直後および再養生後のセメント硬化体の細孔の容積と寸法の変化を窒素吸着法で調べた。これらの考察によって、コンクリートの受熱による性能低下と再養生による性能回復のメカニズムを明らかにした。

非セメント系の無機補修材料を開発するために、凝結遅延剤および収縮低減剤の開発を行った。凝結遅延剤と収縮低減剤の添加によって、補修材料は、十分な可使時間を有し、硬化過程では体積の変化を生じない。さらに、廃棄物を用いた無機補修材料を試作し、圧縮強度、可使時間、粘度、接着性および硬化収縮率などの測定を行った。

なお、低圧注入と高圧注入の補修効果の違いを調べ、注入の間隔と圧力、および注入材料の粘度の影響を考察し、最適な補修工法の検討を行った。さらに、補修したコンクリー

トの圧縮強度などの性能を考察した。

4. 研究成果

(1) 加熱を受けたコンクリートの性能および再養生による変化の解明

コンクリートの加熱後の質量(M)、長さ(L)、動弾性係数(E_d)および超音波伝播速度(V_u)の変化を実験的に考察し、加熱温度、加熱前の強度、冷却方法、再養生方法と期間がこれらの性能変化に及ぼす影響を検討した。結果として、加熱後の水中再養生によって、供試体の M, L, E_d および V_u は、加熱直後より大幅に増加するが、空气中再養生の場合、これらの増加は僅かである。再養生によるこれらの性能変化は、水中再養生の場合には最初の1ヶ月に、空气中再養生の場合には最初の1週間に主に発生する。加熱温度または加熱前の強度が高いほど、M, E_d および V_u の低下率は大きい、水中再養生による増加は多い。しかし、長さ増加は、高強度コンクリートのほうが少ない。空気冷却に比べ、水急冷却は E_d と V_u を大幅に低下するが、空气中再養生の場合の性能回復に大きな影響を与えない。

また、普通(Ns)、高強度(Hs)、繊維高強度コンクリート(Hsf)の加熱後の再養生による付着強度の変化を考察し、加熱前の強度レベル、加熱温度(300~500)、冷却方法、再養生方法および再養生期間の影響について検討を行った。得られた結果として、1か月の水中養生+空气中養生を行った供試体の付着強度の残存率は、養生材齢が長いほどまたは加熱前の強度は小さいほど大きい。Hs はNs より再養生による残存付着強度の回復は多い。500以下であれば、受熱温度が高いほど、再養生による回復が多い。表面湿潤養生の場合、空气中冷却であれば、300と400で加熱されたコンクリートは再養生に付着強度の回復を示さない。500加熱・空气中冷却と300~500加熱・水冷却の場合、再養生によって残存付着強度は増加し、3ヶ月材齢の増加量の大小順は、Hsf Hs Nsである。表面湿潤再養生に比べ、水中再養生のほうが回復率が高い。

圧縮強度と空気量はそれぞれ38.1MPaと6.5%であった普通コンクリートを300~500加熱した後に水中急冷却してから空气中(20±2, 60% R.H.)で1週間~3ヶ月養生した。凍結融解試験はJIS A 1148:2010のA法に準じて試験体を水中に3日浸漬した後に試験を開始し、180サイクルまで行った。得られた主な結果として、普通コンクリートの受熱温度が高いほど、共鳴振動数が小さくなった。

凍結融解による劣化程度と劣化速度は、中レベルの受熱温度の場合是最も大きかった。3ヶ月の気中再養生で耐凍害性を高め、凍害による劣化速度を減少した。しかし、400の場合には1ヶ月の再養生は、耐凍害性を損害し、凍害による劣化速度を増大した。

また、300~500加熱された普通コンクリート(圧縮強度44.0MPa、空気量3.0%)、高

強度コンクリート(圧縮強度61.7MPa、空気量5.7%)および高強度繊維コンクリート(圧縮強度57.0MPa、空気量4.0%)の表面湿潤再養生による凍結融解抵抗性の変化を考察した。高強度繊維コンクリートにポリプロピレン繊維を1.8kg/m³の割合で添加した。繊維の密度、長さ、直径はそれぞれ0.91g/cm³、12mmおよび18mmであった。加熱された普通コンクリート(Ns)と高強度コンクリート(Hs)を散水で3ヶ月間表面湿潤養生した後に5ヶ月気中自然養生した。2ヶ月と8ヶ月の養生材齢に凍結融解抵抗性を測定した。一方、加熱された高強度繊維コンクリート(Hsf)を散水で3ヶ月間表面湿潤養生した。2ヶ月と3ヶ月の養生材齢に凍結融解抵抗性を測定した。これらの実験で得られた主な結果として、Ns, Hs, Hfsの受熱温度が高いほど、受熱直後の一次振動共鳴数が小さい。空气中冷却より、水中冷却のほうが一次振動共鳴数の減少は多い。

加熱直後に、NsとHfsの凍結融解による劣化速度は、未加熱より小さい又は同等である。Hsの加熱直後の耐凍害性は未加熱より140サイクルまで高いが、140サイクル以降に低い。加熱温度が300を超えたら、Ns, Hfsの加熱後に3ヶ月以上再養生しても耐凍害性は、未加熱より低く、加熱温度が高いほど劣る。500以下加熱されたHsは、2ヶ月以上再養生されれば、耐凍害性が未加熱のものと同等になるが、500の加熱を受けると、耐凍害性が未加熱より低い。Nsの場合、凍結融解サイクルの増加に伴って、質量は減少する。HsとHfsの場合、ばらつきがあるが、試験期間の質量は試験開始時より大きく、約120サイクルまでサイクル数とともに増加するが、その以降は減少する。未加熱の試験体に比べ、質量減少は少ないまたはほぼ同等なレベルである。冷却方法が再養生後の耐凍害性に与える影響がはっきりに見られなかった。

また、300~500加熱されたNs, Hs, Hfsの圧縮強度とヤング係数の表面湿潤再養生による変化を明らかにした。加熱前の強度レベル、加熱温度の高低および冷却方法に拘らず、加熱後の圧縮強度は低下し、水急冷却の場合は空气中自然冷却より低下の程度は大きい傾向が見られた。また、加熱温度が高いほど、強度の低下程度は大きいことが認められた。加熱後に表面湿潤養生されたコンクリートの圧縮強度は、養生材齢が1ヶ月から3ヶ月までの増加に伴って若干増加する傾向が見られた。Nsに関して500加熱・空气中冷却の試験体の圧縮強度は、3ヶ月の再養生により約15%増加し加熱前と比べ89%まで回復した。しかし500加熱・水冷却の試験体の圧縮強度は3ヶ月間再養生しても殆ど変わらなかった。また300加熱と400加熱・空气中冷却の試験体の圧縮強度は3ヶ月再養生後よりも加熱直後の方が高い。一方、Hsに関しては、300と400加熱された試験体の圧縮強度と表面湿潤養生材齢の間に一義的な

関係が見られないが、500 加熱・水冷却の試験体の圧縮強度は、3 ヶ月養生により加熱直後より 11%増加し、加熱前に比べ 84%の性能まで回復し、空气中冷却の試験体でも加熱直後より 9%回復した。Hfs に関しては全ての加熱温度水準で回復しており、500 加熱の試験体においては空気、水冷却共に加熱直後に比べて 30%程度で回復した。また Hfs の試験体においても 300,400 加熱の試験体は 500 加熱に比べて回復率が低かった。

すべての試験体のヤング係数は、加熱直後に大幅に低下し、再養生により増加する傾向が見られた。加熱前に比べ、加熱直後の Ns, Hs, Hfs のヤング係数はそれぞれ約 31%, 41%, 29%であり、3 ヶ月養生後は約 58%, 70%, 68%になった。空气中冷却と水冷却の回復率を比べると、空気冷却の方がヤング係数の回復率は高かった。Ns と Hfs の加熱直後のヤング係数の低下程度は Hs に比べ小さく、ヤング率の回復程度も小さかった。

(2) 加熱を受けたコンクリートの性能低下および再養生による性能向上のメカニズムの解明

セメント硬化体を 300~500 加熱し空气中または水中冷却してから、空气中または水中に再養生した。加熱直後と1ヶ月間再養生後の細孔量と細孔寸法を窒素吸着法で考察した。得られた主な結果として、セメン

ト硬化体が加熱を受けると、総細孔量は増加し、ゲル空隙は粗大化するが、水中再養生によって小さいゲル空隙は増え、総細孔量は減少する。加熱温度が高いほど、4nm のゲル空隙は少なくなり、再養生後の残存細孔量が多い。空气中再養生に比べ、水中再養生のほうが総細孔量の減少と 4nm のゲル空隙の増加は多い。

セメント硬化体の高温加熱後の表面ひび割れおよび再養生による変化を光学顕微鏡で観察した(図 1 を参照)。主な結果として、水中養生によるひび割れ幅の低減は遥かに気中養生の場合より高かった。普通強度試験体のひび割れ幅の再養生による低減は高強度試験体より大きかった。再養生期間が長いほど、ひび割れ幅は小さかった。

モルタルについては、加熱直後のモルタルでは細骨材の周りに微細なひび割れが多く見られた。しかし、水中再養生後では、ひび割れは大幅に減少することが認められた。

一方、セメント硬化体を 300~500 加熱し空气中または水中冷却してから、空气中または水中に再養生した。加熱直後と1ヶ月間再養生後のセメントの水和生成物量を XRD と TG-DTA によって考察した。得られた主な結果として、セメント硬化体の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と CSH は、受熱によって減少するが、再養生によって加熱直後より増加する。加熱温度

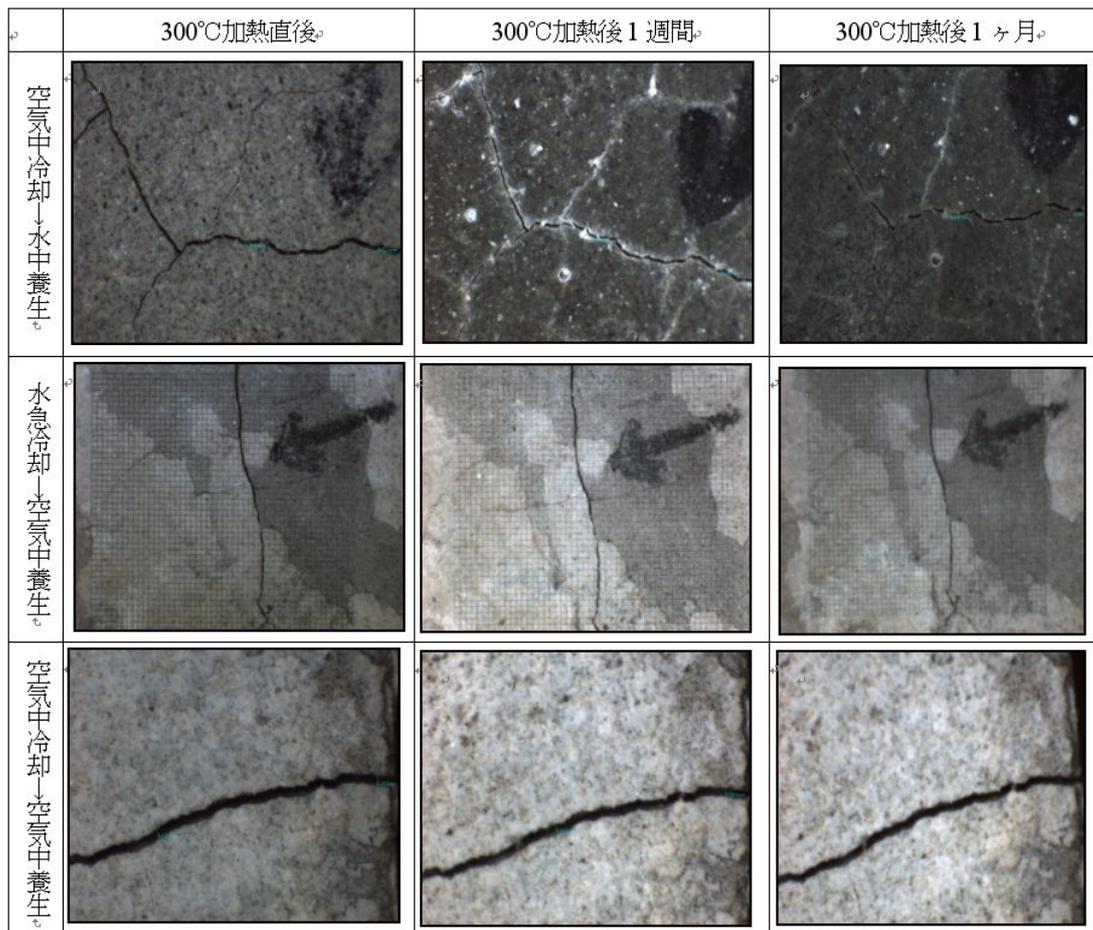


図 1 セメント硬化体(水セメント比: 0.38)の表面ひび割れおよび再養生による変化

が高いほど、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と CSH の減少は多く、再養生による増加率は大きい。また、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と CSH の残存量は未加熱より少ない。水中再養生と水中冷却は、加熱後の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と CSH の回復に対して有利である。

以上の結果より、コンクリートは加熱を受けると、水和生成物量が減少し、ひび割れが発生することはその性能低下の原因となることがわかった。また、再養生して、水和生成物量は増加し、ひび割れの数量とサイズが減少するが、加熱前の状態に戻れない。これは、再養生によって性能が向上するが、完全に回復できない理由であると考えられる。

(3) 非セメント系無機補修材料の開発

都市ごみ焼却灰溶融スラグなどの廃棄物を主成分とし、常温に硬化できる非セメント系無機補修材料の凝結時間は 40 以内であり、硬化過程では収縮は発生する。この問題を解決するために、酒石酸塩を主成分とする凝結遅延剤(1 種類)およびエステル系とエーテル系高分子収縮低減剤(2 種類)を開発した。凝結遅延剤の添加によって補修材料の凝結時間を 1.8~2.5 倍延長できる。また、収縮低減剤の添加によって補修材料の硬化収縮率をほぼゼロにすることができる。

上述の 2 種類の添加剤の利用によって、凝結時間が 60~120 分であり、無収縮であり、28 日材齢の常温養生圧縮強度が $36\text{N}/\text{mm}^2$ 以上であり、粘度が $3000\text{mPa}\cdot\text{s}$ 以下の補修材料を作製することができた。この補修材料中の粒子のサイズは $50\mu\text{m}$ 以下で 0.02mm 以上のひび割れに注入できる。また、注入工法を検討する結果として、低圧注入にも $0.2\sim 0.5\text{MPa}$ の高圧注入にもこの材料を適用できる。火害を受けたコンクリートのひび割れを本研究で開発した補修材によって補修すると、圧縮強度が向上することが確認された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4 件)

- (1) 岡田朋久・李柱国・橋爪進・永井伴英：凝結遅延剤を添加したジオポリマーコンクリートの性能に関する実験的考察, 査読有, Vol. 38, No.1, 2016.7(採用印刷中)
- (2) 李柱国・流田靖博・杉原大祐：高温加熱を受けたコンクリートの再養生による性能変化と回復に関する研究 - 質量、長さ、動弾性係数および超音波伝播速度について, 査読有, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp.363-370, 2016.3
- (3) 李柱国・流田靖博：高温加熱を受けたコンクリートの再養生による性能変化と回復に関する研究 - 鉄筋との付着強度について, セメント・コンクリート論文集, 査読有, Vol.69, pp.371-378, Vol.69, 2016.3

- (4) 岡田朋久・菅彰・橋爪進・李柱国：ジオポリマーに適用する凝結遅延剤に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 37, No.1, pp.1975-1980, 2015.7

[学会発表](計 21 件)

- (1) 北里慎悟・李柱国・岡田朋久・橋爪進・永井伴英・高垣内仁志：フライアッシュと高炉スラグ微粉末を併用したジオポリマーコンクリートの性能に関する実験的考察, その 2: 可使時間と力学性能に及ぼす凝結遅延剤の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), 査読無, 2016.8(印刷中), 福岡大学(福岡県福岡市)
- (2) 岡田朋久・李柱国・北里慎悟・橋爪進：フライアッシュと高炉スラグ微粉末を併用したジオポリマーコンクリートの性能に関する実験的考察, その 6: 凝結遅延剤の作用機構, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), 査読無, 2016.8(印刷中), 福岡大学(福岡県福岡市)
- (3) 岡田朋久・李柱国・橋爪進・北里慎悟：ジオポリマーの乾燥収縮による体積変化を制御する添加剤に関する研究, 建設分野におけるジオポリマー技術の現状と課題に関するシンポジウム, 査読無, 2016.6, 日本コンクリート工学会(東京都千代田)(印刷中)
- (4) 李柱国・流田靖博：高温加熱を受けたコンクリートの性能回復に関する実験的考察, その 6. 表面湿潤再養生後の耐凍害性(普通コンクリート), 査読無, pp.75-76, 2016.5, ホテルメトロポリタン(東京都豊島区)
- (5) 李柱国・流田靖博：高温加熱を受けたコンクリートの性能回復に関する実験的考察, その 7. 表面湿潤再養生後の耐凍害性(高強度と高強度繊維コンクリート), 査読無, pp.77-78, 2016.5, ホテルメトロポリタン(東京都豊島区)
- (6) 李柱国・北田達也・杉原大介・流田靖博：高温加熱を受けたコンクリートの性能回復に関する実験的考察, その 8. 内部構造の変化, 査読無, pp.79-80, 2016.5, ホテルメトロポリタン(東京都豊島区)
- (7) 李柱国・北田達也・杉原大介・流田靖博：高温加熱を受けたコンクリートの性能回復に関する実験的考察, その 9. 化学組成の変化, 査読無, pp.81-82, 2016.5, ホテルメトロポリタン(東京都豊島区)
- (8) 大神晃・李柱国・北田達也・杉原大祐・流田靖博：高温加熱を受けたセメント硬化体の再養生による内部構造と化学組成の変化に関する研究, 2015 年度日本建築学会中国支部研究報告集, 査読無, Vol.39, pp.61-64, 2016.3, 近畿大学(広島県東広島市)
- (9) Z. Li, and Y. Ryuda: Bond strength recovery of fire-damaged concrete after

post-fire-curing, Proceedings of 8th International Structural Engineering and Construction Conference (ISEC-8), 査読有, pp.719-724, 2015.11. 23-28, Sydney, Australia

- (10) 菅彰・李柱国・岡田朋久・橋爪進・北里慎悟：ジオポリマーに適用する凝結遅延剤に関する研究, その 1：研究の背景および概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 査読無, pp.631-632, 2015.9 東海大学(神奈川県平塚市)
- (11) 北里慎悟・李柱国・岡田朋久・橋爪進・菅彰：ジオポリマーに適用する凝結遅延剤に関する研究, その 2：凝結遅延剤が凝結時間に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 査読無, pp.633-634, 2015.9 東海大学(神奈川県平塚市)
- (12) 岡田朋久・李柱国・橋爪進・菅彰・北里慎悟：ジオポリマーに適用する凝結遅延剤に関する研究, その 3：凝結遅延剤が流動性と圧縮強度に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 査読無, pp.635-636, 2015.9 東海大学(神奈川県平塚市)
- (13) 李柱国・流田靖博：高温加熱を受けたコンクリートの性能回復に関する実験的考察 その 3. 鉄筋コンクリートの付着性能, 第 69 回セメント技術大会講演要旨, 査読無, pp.111-112, 2015.5, ホテルメトロポリタン(東京都豊島区)
- (14) 李柱国・流田靖博・杉原大祐：高温加熱を受けたコンクリートの性能回復に関する実験的考察 その 4. 気中再養生による凍結融解抵抗性の変化, 第 69 回セメント技術大会講演要旨, 査読無, pp.113-114, 2015.5, ホテルメトロポリタン(東京都豊島区)
- (15) 李柱国：高温加熱を受けたコンクリートの性能回復に関する実験的考察 その 5. ひび割れの変化, 第 69 回セメント技術大会講演要旨, 査読無, pp.115-116, 2015.5, ホテルメトロポリタン(東京都豊島区)
- (16) 渡邊佳直・李柱国・流田靖博・杉原大祐：高熱加熱を受けたコンクリートの性能および再養生による回復に関する実験的考察, 2014 年度日本建築学会中国支部研究報告集, 査読無, Vol.38, pp.37-40, 2015.3, 米子高専(島根県米子市)
- (17) 藤永勇太・李柱国・池田攻・大久保孝昭：ジオポリマーの付着性能に関する研究, 2014 年度日本建築学会中国支部研究報告集, 査読無, Vol.38, pp.13-16, 2015.3, 米子高専(島根県米子市)
- (18) 李柱国・麻川昂佑・流田靖博・杉原大祐：高温加熱を受けたコンクリートの性能回復に関する実験的考察 その 1. 質量変化, 第 68 回セメント技術大会講演要旨, 査読無, pp.316-317, 2014.5, ホテル

メトロポリタン(東京都豊島区)

- (19) 李柱国・麻川昂佑・流田靖博・杉原大祐：高温加熱を受けたコンクリートの性能回復に関する実験的考察 その 2. 動弾性係数と長さの変化, 第 68 回セメント技術大会講演要旨, 査読無, pp.318-319, 2014.5, ホテルメトロポリタン(東京都豊島区)
- (20) Z. Li, K. Ikeda, and Y. Zhang : Expansion of geopolymer concrete using ground molten slag of municipal waste incineration residue, *Proc. of 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 査読有, pp.756-785, 2013.8, 京都府京都市
- (21) 麻川昂佑・李柱国・流田靖博：火災を受けた鉄筋コンクリートの付着性能および再養生による回復挙動に関する実験的研究, 2013 年度日本建築学会中国支部研究報告集, 査読無, Vol.37, pp13-16, 2014.3, 広島大学(広島県東広島市)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 2 件)

名称：ジオポリマー用収縮低減剤及びジオポリマー硬化体
発明者：李柱国・岡田朋久・北里慎悟・橋爪進・菅彰
権利者：同上
種類：特許(発明)
番号：特願 2016-96908
出願年月日：2016 年 5 月 13 日
国内外の別：国内

名称：ジオポリマー用混和剤及びジオポリマー硬化体
発明者：李柱国・岡田朋久・北里慎悟・橋爪進・菅彰
権利者：同上
種類：特許(発明)
番号：特願 2016-96908
出願年月日：2016 年 5 月 13 日
国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

李柱国 (LI ZHUGUO)
山口大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：50432737

(2) 研究分担者

大久保 孝昭 (OHKUBO TAKAAKI)
広島大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：60185220