

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 19 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289130

研究課題名(和文) 60～80 領域の高温負荷がもたらすセメント硬化体の物性変化とその機構の解明

研究課題名(英文) Study on characteristics change and its mechanism of cementitious materials exposed to 60-80 degrees C

研究代表者

浅本 晋吾 (ASAMOTO, Shingo)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：50436333

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000 円

研究成果の概要(和文)：本研究では、セメント硬化体に60～80 の高温が作用したときの圧縮強度などの力学的物性の変化、さらには、化学的な劣化について検討を行った。その結果、80 の高温が作用すると、20 一定条件に比べ、強度の増進が小さくなること、空隙構造変化の観点から考察された。また、石灰石微粉末を含んだ場合、初期に高温が作用したとき、セメント硬化体に亀甲状のひび割れをもたらす可能性が高くなることを示した。こうした高温作用による化学劣化の抑制、強度低下の抑制も骨材条件によっては、セメントを石炭灰(フライアッシュ)で一部置換することが有効であることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：In this study, mechanical properties such as compressive strength and chemical degradation of cementitious materials exposed to 60-80 °C was examined. As a result, history of 80 °C during the curing can retard the strength development comparing to 20 °C curing case based on the pore structure change. It was also found that the cement with limestone powder is more probable to cause a map cracking on the surface of cementitious materials when they are exposed to high temperature at early ages. It is suggested that the replacement of cement with fly ash can be effective to inhibit the chemical degradation and to avoid the large strength reduction depending on the aggregate type.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：セメント硬化体 高温負荷 物性変化 遅延エトリンガイト生成 フライアッシュ

### 1. 研究開始当初の背景

プレストレストコンクリート(以下,PC)構造物では,断面の縮小,クリープ低減の観点から比較的高強度のコンクリートが従来から使われている.土木分野で使用される60MPaクラスの高強度コンクリートにおける初期温度の影響の検討は少ないが,季節,部材によっては初期に大きな水和熱を発生し,内部では60℃を超える高温になり得る.また,比較的放射能レベルの高い低レベル放射性廃棄物を埋設する余裕深度処分(地下50-100m)において,人工バリア材であるセメント系材料は,廃棄体の崩壊熱によって数年から数十年にかけて高温の負荷を受ける可能性がある.

高強度コンクリートの水和熱,放射性廃棄物処分施設における廃棄体の崩壊熱による高温作用は,いずれも60~80℃領域にある.これらの温度領域では,火災などの温度領域のように激しいコンクリートの劣化はもたらさないものの,分子レベルのC-S-H構造を変質させ,10~100nmの空隙が増大する可能性や,乾燥を受けると,表層のマイクロクラックの発生をもたらしことなどが研究グループの既往の研究から示唆されていた.よって,60~80℃領域の高温作用は,セメント硬化体の組織構造に変化をもたらし,強度・剛性の低下,収縮,マイクロクラックを含むひび割れ発生,物質透過性の増大など耐久性に大きな影響を与えることになる.また,フライアッシュや高炉スラグ微粉末を活用すると,水和熱低減,空隙緻密化の観点から,混和材料の使用がこうした特殊環境での物性改良をもたらすものと期待される.

以上の背景のもと,60~80℃領域の高温負荷がもたらすセメント硬化体の物性変化とその機構を解明する本研究計画の着想の発端となった.

### 2. 研究の目的

本研究では,セメント硬化体の組織構造の観点から初期,持続的な高温負荷がもたらす高強度コンクリート,セメント系人工バリアの強度,収縮,クリープ,物質移動抵抗性といった物性変化の機構を解明し,こうした特殊な環境における混和材の効果の検証,高耐久性をもたらす材料設計の提案を目的とした.

初期,持続的な高温負荷によるセメント硬化体の組織構造変化の検討し,組織構造に基づき,強度・剛性,収縮,クリープなどのセメント硬化体の物性変化をもたらす機構を明らかにする.さらには,高炉スラグ,フライアッシュを使用し,初期,持続的な高温履歴を受けるセメント硬化体の物性を組織構造の観点から評価し,混和材使用の効果を微視的な機構に基づき明らかにする.そのうえで,特殊な高温環境で構造物に高耐久性をもたらす材料設計について提案を行うことを最終的な目的とした.

### 3. 研究の方法

(1)低水結合材比におけるセメント硬化体の力学特性に及ぼす高温履歴の影響

高温負荷が低水結合材比のセメント硬化体の力学特性に及ぼす影響を検討するため,普通ポルトランドセメント(以下,OPC),高炉セメントB種(以下,BB),フライアッシュセメント(以下,FB)用いたセメントペースト及びモルタルを,異なる温度履歴で養生した.温度履歴は,20℃,もしくは80℃一定,さらにマスコンクリート中心部の水和発熱を模擬した初期高温履歴(図-1)の3種の温度環境とした.その後,圧縮試験,水銀圧入試験を行い,高温作用による強度,静弾性係数の変化について,空隙構造の観点から考察を行った.

(2)初期に水和熱による高温履歴を受けたセメント硬化体のクリープ特性

クリープについては,モルタル試験体を用いて,曲げによる持続載荷試験で,初期高温履歴(80℃)の有無およびフライアッシュ混和がクリープ特性に及ぼす影響について検討した.養生については,持続載荷を施す材齢28日まで,20℃で水中養生を施したものを,初期高温履歴(図-1)を与え,材齢28日まで封緘養生したものの2種類で検討した.

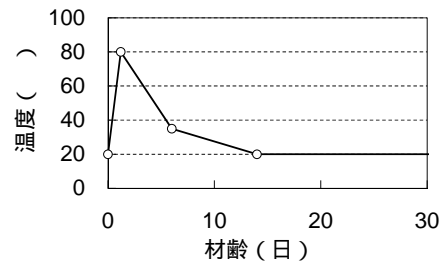


図-1 マスコンクリート中心部の水和発熱を模擬した初期高温履歴

(3)エトリンガイト遅延生成における混和材の影響

初期に水和発熱などによって高温が作用したコンクリートで,硬化後継続的な水分供給がなされた場合,硫酸塩劣化の一つであるエトリンガイトの遅延生成(Delayed Ettringite Formation, 以下,DEF)による膨張に起因した亀甲状のひび割れの発生が懸念される.スリランカの南部高速道路の一部の橋脚フーチングにおいて,建設後わずか4年で亀甲状のひび割れが観察され,DEFの可能性が指摘されている.このフーチングでは,普通ポルトランドセメントの15~20%を石灰石微粉末に置換したPortland limestone Cementが使用されていた.よって,初期に90℃のDEF促進高温負荷を与えたセメントペースト,モルタル試験体を用いて,DEFの発生に対する石灰石微粉末の影響とフライアッシュによるDEF抑制効果について検討した.セメントの種類として,早強ポルトランドセメントのみを用いたもの(HPC),スリランカのセメントを模擬した石灰石微粉末をHPC質量の

15%置換した配合(LSP),フライアッシュをHPC質量の25%置換した配合(FA)の3種類で検討した。また,使用材料の石灰石微粉末や石灰石骨材に由来する炭酸イオンの影響をより効果的に把握するため,外部より炭酸イオンを供給する系でも,実験を行った。

#### 4. 研究成果

(1) 低水結合材比におけるセメント硬化体の力学特性に及ぼす高温履歴の影響

本節の図表における供試体の表記は,(配合種類 P:セメントペースト,M:モルタル)(セメント種類)-(養生種類 2:20,8:80,H:初期高温履歴あり)(材齢日数)で示す。

表-1に,セメントペーストの圧縮試験の結果を示す。混和材添加のセメントペーストは,80養生,初期の高温作用で,材齢28日強度が増加しており,スラグやフライアッシュの反応が促進されたためと考えられた。一方,混和材を用いなかったOPCでは,80で養生すると,圧縮強度,ヤング係数ともに,常温養生に比べ小さくなった。これは,高温環境で自己乾燥が卓出し,C-S-Hの構造が変化し,空隙が粗大化したためであると考えた。

材齢91日の20養生,初期高温履歴を与えた供試体の圧縮強度は,材齢28日養生の供試体に比べ,すべての配合で大きくなった。また,材齢28日とは異なり初期高温履歴を受けた供試体の長期強度は20養生に比べ,BBを除き,小さくなった。既往の研究によれば,長期強度の低下は初期高温履歴が水和反応を促進させ内部水和物が著しく緻密化し,水和反応速度の低下を理由にあげている。BBについてはこの内部水和物の緻密化が初期の水和で発生しなかったことが考えられるが,これについては今後の検討課題としたい。ヤング係数は,養生温度,セメント種類の影響はさほど見られなかった。

表-1 セメントペーストの圧縮強度及びヤング係数

供試体	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
POPC-2(28)	71.7	22.4
POPC-H(28)	73.6	20.1
POPC-8(28)	63.5	17.9
POPC-2(91)	97.0	24.1
POPC-H(91)	90.4	22.1
PBB-2(28)	56.0	21.1
PBB-H(28)	66.0	19.3
PBB-8(28)	69.1	18.5
PBB-2(91)	67.3	20.7
PBB-H(91)	88.5	20.6
PFB-2(28)	66.9	19.5
PFB-H(28)	75.0	19.4
PFB-8(28)	68.0	19.0
PFB-2(91)	94.0	21.5
PFB-H(91)	86.6	21.5

表-2 モルタルの圧縮強度及びヤング係数

供試体	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
MOPC-2(28)	69.3	29.3
MOPC-H(28)	71.4	30.1
MOPC-8(28)	58.1	26.8
MOPC-2(91)	73.5	27.1
MOPC-H(91)	58.7	27.4
MBB-2(28)	61.9	26.9
MBB-H(28)	69.1	30.3
MBB-8(28)	55.8	26.8
MBB-2(91)	75.1	29.8
MBB-H(91)	59.0	27.4
MFB-2(28)	65.1	28.7
MFB-H(28)	68.7	31.3
MFB-8(28)	48.9	28.9
MFB-2(91)	81.0	29.3
MFB-H(91)	58.7	27.0

表-3 モルタルの圧縮強度及びヤング係数の追加実験結果

供試体	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)*
MOPC-2(28)	82.2	35.8
MOPC-H(28)	66.7	32.7
MOPC-2(91)	85.1	34.1
MOPC-H(91)	71.9	32.3
MBB-2(28)	84.9	37.4
MBB-H(28)	61.1	34.2
MBB-2(91)	88.9	41.8
MBB-H(91)	60.2	36.7
MFB-2(28)	70.2	32.5
MFB-H(28)	68.3	32.4
MFB-2(91)	76.2	36.8
MFB-H(91)	72.4	33.9

\*ヤング係数は全般的にかなり高い傾向となったため,参考値

表-2に,モルタルの圧縮試験の結果を示す。セメントペーストと同様に,材齢28日では,初期高温履歴を作用させたモルタル供試体の強度,ヤング係数は,20養生の供試体と比べ,すべての配合で大きくなった。これは初期の高温履歴による水和反応の促進が理由として考えられた。80で養生した供試体は,20養生の供試体に比べ強度は小さくなった。高温環境下では,水和反応が促進され,セメントペースト部分での自己収縮が卓越し,細骨材がその自己収縮を拘束するため,細骨材周りでも微細なひび割れが発生し,強度が低下したと推察された。

材齢91日の供試体の強度は,20養生では,材齢28日に比べ,どの材料でも増加した。一方,初期高温履歴を与えた91日養生の圧縮強度は,28日養生供試体より低下し,20養生より小さくなった。これはセメントペーストでは見られない傾向であり,これらの理由は現状明確ではないが,骨材界面がある状態で高温の履歴を受けるとモルタルの

長期強度，ヤング係数が低下する可能性を示唆していると考えた。

その後，ロットの異なる同種の細骨材（川砂）を用いて，同一配合，同一養生条件で，材齢 91 日までモルタルで，追加で行った検証実験の結果を表-3 に示す．このときには，材齢 28 日でも初期高温履歴を受けると 20 養生より，いずれの配合も強度が低下しており，また，初期高温履歴を受けた場合の材齢 28 日から 91 日にかけての強度低下は，BB のみわずかに確認された．また，フライアッシュを用いると，初期高温作用による強度低下は小さくなった．石灰石細骨材を用いたさらなる追加実験でも，材齢 28 日では，表-3 の結果と同様の結果を示し，初期高温履歴を受けたフライアッシュの強度低下は他の配合に比べ，小さかった．初期高温作用によるモルタルの強度の変化は，骨材に大きく依存することを示していると考えられ，今後，大きく物性が異なる骨材を用いてさらなる検討が必要といえる．

図-2 に，材齢 28 日のセメントペーストとモルタルの空隙構造を示す．

まずセメントペーストの空隙構造と強度の関連を考える．20 養生した POPC-2(28) と初期の高温負荷を作用させた POPC-H(28) で比較すると，POPC-H(28) は，10nm 付近の細孔量が増加している．しかしながら，初期高温による水和反応の促進により，数 nm 付近の空隙は減少し，水銀圧入法で測れない小さな空隙にシフトし，緻密化したと考えられ，POPC-H(28) の圧縮強度は 20 養生の供試体と同程度であったと考えた．一方，80 養生の POPC-8(28) は，POPC-2(28)，POPC-H(28) の供試体よりも，数 10nm から 100nm 付近の空隙が増加している．これは，長期的な高温負荷で自己乾燥が進み，C-S-H からの水と水の脱水により，数 10nm から 100nm 付近の細孔を増加させたためと考えた．よって，POPC-2(28)，POPC-H(28) に比べ，強度，ヤング係数がともに低下したといえる．

20 環境で養生した PBB-2(28) と高温負荷を与えた PBB-H(28) と PBB-8(28) の空隙構造を比較すると，高温環境下で高炉スラグ微粉末の水和反応が促進され，PBB-H(28) と PBB-8(28) で 10nm 付近の空隙が増加している．BB セメントペースト供試体は，OPC セメントペーストの空隙構造と異なり，短期的な高温負荷と長期的な高温負荷による空隙構造の違いはさほど見られなかった．この理由として，高炉セメントから生成される C-S-H は OPC と構造が異なるためと推察した．

20 養生した PFB-2(28) と高温負荷を作用した PFB-H(28) と PFB-8(28) を比較すると，高温の履歴によるフライアッシュのポゾラン反応の促進によって，10nm 付近の緻密な細孔が増加している．高温作用を受けると，20 養生の供試体より圧縮強度が大きかったのは，ポゾラン反応による空隙の緻密化のためだといえる．

次に，モルタルの空隙構造と強度について考察する．20 養生では，いずれの配合も数 10nm 付近に空隙のピークが確認された．初期の高温履歴を受けた場合，この数 10nm 付近のピークは，BB，FB では細孔側に移動し，OPC でもそのピークは消失し，数 nm の空隙が増えており，緻密化する傾向があると言え，その結果，累積細孔量は若干多くなるものの，いずれの場合も強度は 20 養生に比べ増加したと考えられた．一方で 28 日間 80 の高温を作用させると，モルタル供試体の MOPC-8(28)，MBB-8(28)，MFB-8(28) では空隙が著しく粗大化し累積細孔量も大きくなる．これは上述のように，自己乾燥による骨材周りでの損傷やひび割れに起因しており，これによって強度が低下したと考えた．

以上のように，高温作用は，長期であれば，骨材界面に大きな損傷，強度の低下をもたらす．短期の初期の高温作用であれば，大きな強度低下はもたらさないものの，長期的な強度は若干低下し，骨材によってはフライアッシュの活用が有効であることが示唆された．

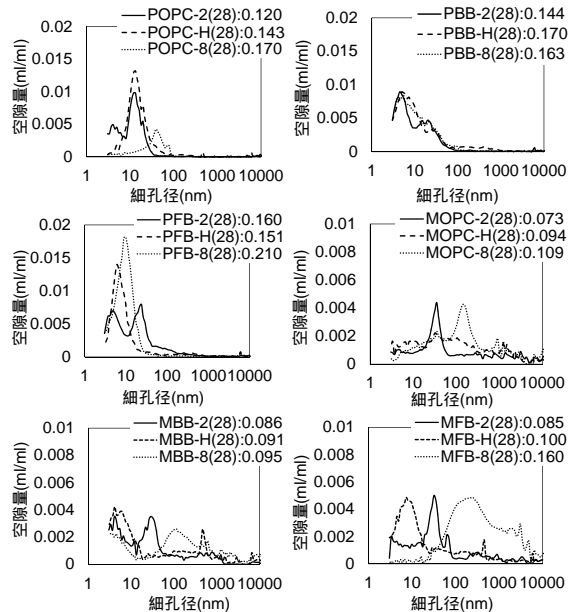


図-2 セメントペースト及びモルタルの材齢 28 日の空隙構造（凡例の供試体名の横の値は，空隙径 10000nm 以下の累積細孔量）

## (2) 初期に高温履歴を受けたセメント硬化体のクリープ特性

図-3 に，20 水中養生，初期高温履歴を与えた養生封緘条件での，OPC，FA の材齢 28 日後の曲げによるスペシフィッククリープひずみを示す．まず，クリープに対する高温履歴の影響について検討すると，高温履歴を与えた方が，OPC，FA とともにスペシフィッククリープが減少している．初期高温履歴によって水和が進行し強度が増加したため，クリープが抑制されたといえる．また，高温履歴養生に関して圧縮縁，引張縁のスペシフィッククリープに差は見られないが，20 養生では圧縮縁のスペシフィッククリープが引張

縁よりも大きい 2.5MPa の応力を作用させたため、引張クリープでは塑性クリープが支配的で、圧縮では弾性域内のクリープが支配的と思われる。その際、後述のように、弾性域のクリープは微細な空隙が増えると小さくなると考えられ、高温作用で微細空隙が増え、圧縮クリープは減少したと考えた。

20 養生、初期に高温履歴を与えた養生とともに、OPC と FA の曲げのスペシフィッククリープは同程度となった。一般に、圧縮強度が大きいほどクリープは小さいと考えられているが、載荷時の材齢の圧縮強度は、どちらの養生条件も OPC の強度の方が FA より大きい。フライアッシュを用いた場合、ポゾラン反応によりペーストの空隙が緻密化され nm レベルの細孔径の空隙が増加する。既往の研究より、nm レベルの緻密な空隙がクリープ挙動には支配的であることが示唆されており、フライアッシュを用いることで強度は小さくとも微細な空隙が増えるため、クリープは抑制され、OPC と FA のクリープは同程度の値となったと考えられる。

以上のように、フライアッシュを用いて微細な空隙が増加した場合、クリープが小さくなることが示唆された。

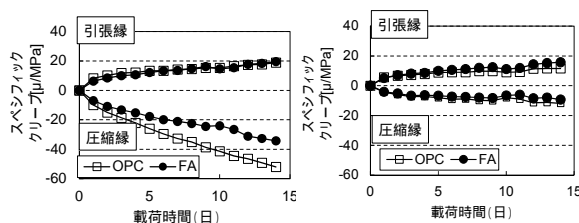


図-3 曲げによる引張縁と圧縮縁のスペシフィッククリープ（左：20 水中養生，右：初期に高温履歴を与えた養生）

### (3) エトリンガイト遅延生成における混和材の影響

本節では、供試体種類や浸漬溶液に関する条件の凡例は（セメント種類）<sub>（SO<sub>3</sub>添加量（%））</sub>（浸漬溶液の種類）とする。ここで、浸漬溶液の種類は、水道水を T、炭酸イオン含有溶液を C と表記する。

図-4 に、初期高温負荷後、20 で水道水に浸漬したセメントペースト、モルタルの膨張量測定の結果を示す。セメントペーストでは、SO<sub>3</sub> を 3% 添加し、石灰石微粉末を混和した LSP 供試体のみ明らかな膨張が見られた。一方で、モルタルは、SO<sub>3</sub> を 3% 添加した LSP、HPC 供試体で膨張が認められ、膨張は石灰石微粉末を添加した LSP 供試体の方が早く始まったが、最終値は LSP の方が若干小さかった。フライアッシュを混和した FA 供試体は、いずれの配合、条件でも明確な膨張は観察されなかった。

セメントペーストとモルタルの膨張を比べると、モルタルの膨張開始が早かった。DEF はセメントペーストマトリックスが膨張する現象であり、モルタルの場合、骨材が膨張

を拘束するため、骨材周辺で応力が不均一になり、ひび割れを発生しやすくなると考えられる。実際、表面ひび割れはモルタルの方が早く観察され、ひび割れの数もセメントペーストより多かった。このひび割れが発生すると、ひび割れを通じて DEF に必要な水分が内部まで浸透しやすくなる。以上のことから、モルタルは、ひび割れ発生による見かけ上の体積増加と水分浸透による DEF 促進によって、ペーストに比べ膨張が早く観察されたと考えられる。

初期高温負荷後、20 で炭酸イオン含有溶液に浸漬させたセメントペースト、モルタルの膨張量測定の結果を図-5 に示す。水道水に浸漬させたときと同様に、ペースト、モルタルともに、SO<sub>3</sub> を 3% 添加し、石灰石微粉末を混和させた LSP 供試体の膨張が早く生じている。SO<sub>3</sub> を添加し、石灰石微粉末のない HPC も、ペースト、モルタルともに大きく膨張した。高濃度の炭酸イオンを外部から供給した場合でも、フライアッシュを 25% 混和した FA 供試体は、材齢 384 日でいずれも膨張挙動を示しておらず、フライアッシュの DEF 抑制効果が発揮されているといえる。

既往の研究によれば、DEF の機構としては以下のようなことが考えられている。水和熱などで 70 以上の初期高温が作用すると、エトリンガイトが分解し、モノサルフェートを中心とした結晶性の悪い AFm 相が生成される。それとともに、多くの硫酸イオンが C-S-H に弱く吸着される。その後、温度が下がり、C-S-H 内に吸着された SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>イオンが徐々に溶出すると、外部生成層に存在するモノサルフェートと反応し、エトリンガイトを生成して、膨張圧を発生すると考えられている。炭酸イオンが内外から供給される場合、炭酸イオンがモノサルフェートと反応し、硫酸イオンを放出し、放出された硫酸イオンが外部生成層にあるモノサルフェートと再び反応することに起因すると考えられる。

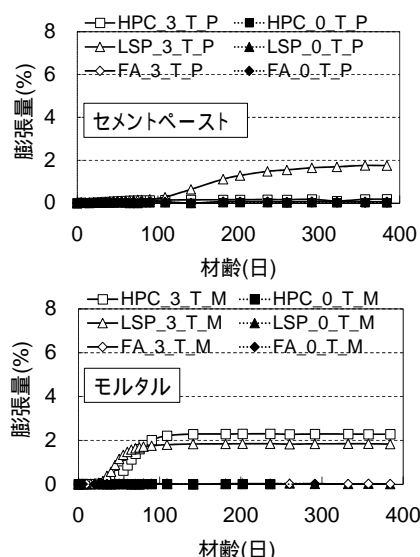


図-4 水道水に浸漬させた各配合の膨張量

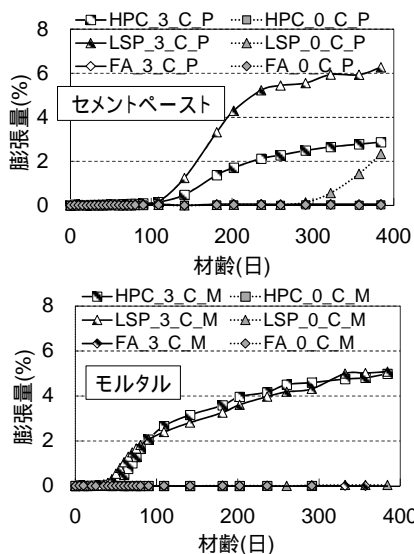


図 - 5 炭酸イオン含有溶液に浸漬させた各配合の膨張量

以上のように、本研究によって、スリランカの Portland limestone cement は DEF を促進する可能性が示されたが、亀甲状のひび割れの事例は、検出の難しい微晶質石英による ASR の可能性も棄却できず、今後詳細な検討が必要と認識している。

#### 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)

浅本晋吾, 村野耕基, 蔵重勲, Anura Nanayakkara: 遅延エトリンガイト生成に及ぼす炭酸イオンの影響に関する検討, コンクリート工学年次論文集, 印刷中, 2016

浅本晋吾, 横井太一, 平林雅也, 小林薫: 混合セメントを用いた RC 部材の持続荷重下の曲げひび割れ進展に対する養生日数, 乾湿繰り返しの影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.712-716, 2014

村野耕基, 浅本晋吾, 蔵重勲, 湊大輔: 低水結合材比におけるセメント硬化体の力学特性に及ぼす高温履歴の影響, セメント・コンクリート論文集, No.68, pp.140-147, 2014

浅本晋吾, 松井久仁雄, 加藤恭介: 細孔内の液体特性に基づくセメント硬化体の体積変化機構の検討, セメント・コンクリート論文集, No.67, pp.195-202, 2013

〔学会発表〕(計 7 件)

湯口綾介, 浅本晋吾, 蔵重勲: 高温作用がセメント硬化体の線膨張係数に与える影響の検討, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 東北大学川内北キャンパス(宮城県仙台市), 2016.9, 発表確定

M. Tsukahara and S. Asamoto: Investigation of Admixtures Effect on Degradation of

Cement Paste in Injection Well, 6<sup>th</sup> International Conference on Structural Engineering and Construction Management 2015, Earl's Regency Hotel, Kandy, Sri Lanka, 12<sup>th</sup> Dec., 2015

S. Asamoto, K. Murano, I. Kurashige and A. Nanayakkara: Investigation into Effect of Mineral Admixture on Delayed Ettringite Formation, The 4th International Symposium on Engineering, Energy and Environment (ISEEE2015), Thammasat University, Pattaya Campus, Chonburi, Thailand, 9<sup>th</sup> Nov., 2015

塚原美晴, 浅本晋吾: 地下特殊環境に曝されたセメント硬化体における混和材の効果に関する検討, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 岡山大学津島キャンパス(岡山県岡山市), 2015.9.17

村野耕基, 嘉数孝志, 蔵重勲, 浅本晋吾: エトリンガイト遅延生成における混和材の影響に関する研究, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 岡山大学津島キャンパス(岡山県岡山市), 2015.9.16

嘉数孝志, 浅本晋吾: 放射性廃棄物処分におけるセメント系人工バリアの Ca 溶脱現象の既存数値解析モデルを用いた超長期予測の検討, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 岡山大学豊中キャンパス(岡山県岡山市), 2014.9.11

S. Asamoto, K. Murano, I. Kurashige and D. Minato: Investigation into Characteristics of Cementitious Materials Exposed to High Temperature, Proceedings of the 6th Asia-Pacific Young Researchers and Graduate Symposium, The Structural Engineering for Sustainable Development (YRGS2014), Thammasat University, Rangsit Campus, Thailand, 1<sup>st</sup> Aug., 2014

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mtr.civil.saitama-u.ac.jp/modules/staff/asamoto.html>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅本 晋吾 (ASAMOTO, Shingo)

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 5 0 4 3 6 3 3 3

(2) 研究分担者

蔵重 勲 (KURAHIGE, Isao)

電力中央研究所・地球工学研究所・主任研究員

研究者番号: 2 0 3 7 1 4 6 1

名和 豊春 (NAWA, Toyoharu)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 3 0 2 9 2 0 5 6