

平成 21 年 6 月 12 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19760301

研究課題名(和文) 実環境条件に基づいたコンクリート構造物の劣化予測モデルの開発

研究課題名(英文) Development of model to predict deterioration of concrete structures based on actual environmental conditions

研究代表者

浅本 晋吾 (ASAMOTO SHINGO)

埼玉大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：50436333

研究成果の概要：

本研究は、降雨、日射が作用する実環境下でのコンクリートの収縮、クリープ(一定荷重作用下において変形が持続的に進行する現象)収縮によって表面に発生するひび割れについて検討を行った。その結果、コンクリートの収縮、クリープともに、降雨が内部に浸透することで大きく抑制されることが分かった。また、クリープは日射による内部温度上昇によって促進され、収縮は巨視的には日射の影響をさほど受けないものの、日射による表層部の局所的な乾燥によって収縮ひび割れは促進されることが分かった。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2007年度 | 2,100,000 | 0 | 2,100,000 |
| 2008年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,300,000 | 360,000 | 3,660,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：コンクリート、収縮、クリープ、収縮ひび割れ、降雨、日射

1. 研究開始当初の背景

実構造物では周辺環境によって局所的に劣化が進行している箇所があり、境界条件に応じた構造物劣化予測は、効果的な補修・補強を行う上で非常に重要である。実環境作用は複雑で多種多様に変動するため、各種劣化に対して影響の著しい気象要素を適切にモデルに組み込むことが肝要であると考えられる。例えば、コンクリートの収縮・クリープ挙動は細孔内水分状態に依存することが知られており、太陽光からの放射、降雨は内

部水分状態を大きく変化させるため体積変動、変形をもたらす。また、乾湿繰り返しによってアルカリ骨材反応、鋼材腐食は促進されるため、日射、雨水に曝される箇所は劣化が激しいことが実構造物で観察されている。以上の観点から、本研究では、気象条件の中でも日射・降雨に重点を置き、これらがもたらすコンクリート構造物の劣化を総合的に診断することを眼目とする。各種劣化現象を個別に取り扱うのではなく、ひび割れによる有害物質移動抵抗性低下、水分吸着による強

度低下、ひび割れ進展など個々が関連する現象を時系列で包括的に捉えることで、境界条件に応じた統合的なコンクリート構造物の劣化予測が可能となる。

2. 研究の目的

本研究は、ナノ～マイクロメートルの空隙内に存在する水分挙動・化学的作用に着目し、日射・降雨といった実環境作用がもたらす無機建設材料の劣化を統合的に捉えることを目的とする。気象情報データベースをもとに、時間依存変形、有害物質浸透、炭酸化などのコンクリート材料劣化を総合的に追跡することで、ひび割れ、鉄筋腐食といった鉄筋コンクリート構造物における癌を境界条件に応じて定量的に予測するシステムの構築することが最終的な目標である。実環境作用による劣化に関しては、国内外ともに塩分浸透、中性化、鉄筋腐食に関する研究が大多数を占め、収縮・クリープ、ひび割れ進展まで含めて検討を行った研究は少ない。本研究では、微視的な機構に立脚しながら一面のみならず多方面から現象を理解し、新設・既設コンクリート構造物に対して適切な耐久性評価を与えるマルチフィジックスシミュレーションの実現を目指すのである。

3. 研究の方法

実環境作用下におけるコンクリート構造物の総合的な劣化予測を目指す本研究において、まずはコンクリートの収縮、収縮ひび割れ、クリープに着目し、それらの現象に日射、降雨といった実環境作用が与える影響の抽出を試みた。日射、降雨の有無条件を変えた3種類の屋外環境(図-1)にコンクリート供試体を暴露し、経時的な収縮、クリープの変化、および鉄筋コンクリートの収縮ひび割れ性状を検討した。表-1に示すように、以下、日射・降雨を受ける環境を環境SR、日射を受け降雨は受けない環境を環境S、日射も降雨も受けない環境を環境N、温度20℃、相対湿度60%の恒温恒湿槽内の一定乾燥環境を環境Cと呼ぶことにする。

収縮、クリープを計測する供試体には、10×10×40cmの角柱供試体を用いた。また、鉄筋の内部拘束によって発生する収縮ひび割れ性状を検討することを目的として、D32の鉄筋を中央に埋め込んだ10×10×100cmの角柱供試体も作製した。配合は、単位水量を170kgとした水セメント比30%、55%の2種類で検討を行った。収縮、収縮ひび割れを計測した供試体は2007年9月中旬に打設を行い、クリープを計測した供試体は、2008年8月中旬に打設し、いずれも打設1日後に脱型、材齢3日まで湿潤養生を行った。その後、上記の各環境条件に暴露し、経時的に収縮、質量変化、クリープを測定した。収縮は基長100mmのコンタク

表-2 各乾燥環境下に暴露された供試体の環境条件

| | 環境条件 |
|----|----------------|
| S | 日射有, 降雨無 |
| N | 日射無, 降雨無 |
| SR | 日射有, 降雨有 |
| C | 温度 20℃, 湿度 60% |



図-1 供試体の暴露環境

トゲージを用いて計測した。また、気温変動によって温度ひずみが発生するため、供試体内部温度を計測し、線膨張係数 $10\mu\epsilon/\text{℃}$ として温度ひずみ分を全体のひずみから差し引いて収縮ひずみを算出した。クリープ計測の供試体については、PC鋼棒によって材齢3日の圧縮強度の約20%の持続荷重を与え、時間依存変形を経時的に計測した。クリープを計測した供試体では、表面にひずみゲージを張り付けることでひずみを計測した。

4. 研究成果

(1) 実環境下における質量変化

図-2に、10×10×40cmの供試体の各乾燥環境下における質量減少の経時変化を示す。質量減少率とは質量減少量を乾燥前供試体質量で除した値である。低水セメント比のコンクリートは空隙が緻密であるため、水セメント比55%のコンクリートに比べ、水分の逸散量は全体的に小さくなっている。

まず日射の影響について述べる。日射を受ける環境Sと日射を受けない環境Nで比較すると、両水セメント比で環境Sに暴露された供試体の質量減少率は環境Nに暴露された供試体の質量減少率を上回っている。日射は乾燥を促進するためにコンクリート内部の水分が蒸発し、質量減少率が大きくなることが確認された。

次に降雨の影響について、降雨の有無が環境条件の相違である環境SとSRで比較すると、降雨を受ける環境SRの供試体の質量減少率は、降雨を受けない環境Sに比べ小さい。降雨をさほど観測せず乾燥が促進されたと考えられる乾燥時間50日から80日の挙動に着目すると、日射も受けても環境SRにおける質量減少率はさほど変わらない。これより、

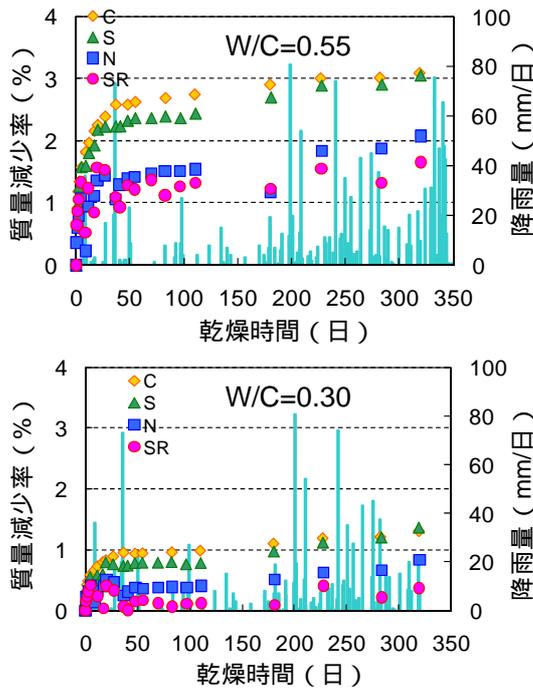


図 - 2 各乾燥環境下における重量変化

一度コンクリート中に浸透した雨水は日射による乾燥促進を受けても蒸発しにくく、質量減少率は降雨浸透の影響を強く受けて小さくなると考えられる。また、コンクリートへの雨水の浸透は、降雨量より降雨時間に依存することが知られており¹⁾、局所的な大雨はないものの、断続的に雨が降った乾燥 80 日から 200 日の期間にかけても環境 SR における供試体の質量減少は緩慢であり、供試体内部に徐々に雨水が滲み込んだと考えられる。

以上のように、質量の経時変化の結果より日射は乾燥を促進し、降雨は乾燥を抑制し、降雨によって内部に雨水が浸透すると、日射を受けても蒸発しにくいことが分かった。

(2) 実環境下における収縮ひずみ

図 - 3 に、水セメント比 55%、30% の 10×10×40cm の供試体の収縮の経時変化を示す。図 - 2 に示したように、全乾燥環境下において水セメント比 55% のコンクリートの質量減少率が水セメント比 30% のコンクリートの質量減少率を大きく上回ったのに対して、収縮ひずみは両コンクリートでさほど相違はない。これは、養生期間が短かったため、乾燥開始後もコンクリート中の水和反応が継続し、自己収縮が乾燥収縮と同時に生じたためであると考えられる。低水セメント比のコンクリートは乾燥収縮が小さくなる一方で自己収縮は大きくなるため、コンクリートの全収縮で考えると、水セメント比の

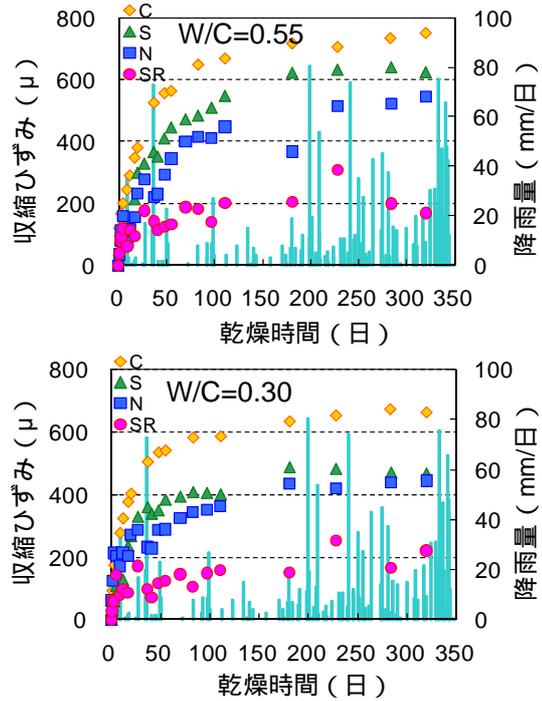


図 - 3 各乾燥環境下における収縮ひずみの経時変化

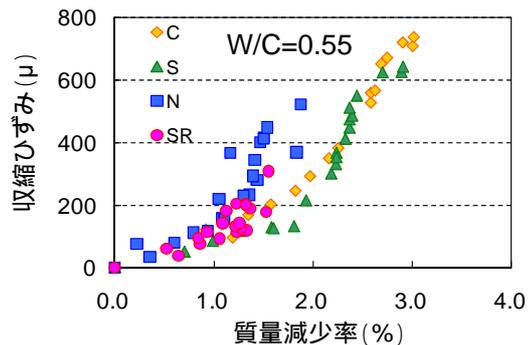


図 - 4 質量減少率と収縮ひずみの関係

相違によって収縮に差が現れない結果になった。

実環境作用の影響に着目すると、環境条件の相違が日射の有無のみである環境 S と環境 N の供試体の収縮ひずみがさほど変わらないことから、日射による乾燥がもたらす収縮ひずみの促進は小さいと考えられる。一方で、多量の降雨を観測した乾燥時間 8 日以降、唯一降雨を受ける環境 SR に暴露された供試体の収縮ひずみの増加が緩慢になっている。前節で考察したように断続的に降雨を受け、乾燥が抑制されたため、環境 SR では乾燥収縮ひずみが小さくなったと考えられる。一般に、コンクリートの乾燥収縮は周囲の湿度の影響が大きいと認識されているが、環境 SR の供試体のみ収縮ひずみが小さいことから、実環境下では降雨の影響が湿度よりも大きいことが推測される。すなわち、大気中の水蒸

気が湿度勾配によってコンクリート内部に浸透するよりも、液体としての降雨が毛細管作用によって内部に浸透する現象の方が収縮抑制に寄与すると考えられる。

以上のように、収縮ひずみは降雨を受ける環境 SR に暴露された供試体のみ小さくなり、日射の有無による相違は確認されなかった。これより、コンクリート構造物の収縮挙動は日射よりも降雨の影響を大きく受けると考えられる。

水セメント比 55%のコンクリートの質量減少率と収縮ひずみの関係を図 - 4 に示す。質量減少率と収縮ひずみの経時変化を比較すると、1%を超える質量減少率に対する収縮ひずみは、環境 S と環境 N で大きく異なることが分かる。これは、コンクリートの収縮発生機構を水分逸散量のみで説明することが困難であることを示唆している。福留、下村は、乾燥速度が早ければ同一逸散水量に対する乾燥収縮ひずみは小さくなることを実験的に示し、乾燥収縮を瞬間変形として弾性変形、時間依存変形として線形クリープを仮定することで、異なる乾燥速度における乾燥収縮ひずみを予測することが可能であることを報告している²⁾。本実験も、環境条件による乾燥速度の違いによって質量減少率に対する収縮ひずみが異なると考えられ、収縮もクリープ挙動の一部とみなす上記考察で現象説明できるのではないかとと思われる。すなわち、環境 S は日射によって乾燥が促進され、日射のない環境 N に比べ乾燥が早く、クリープが進行しないため、同一質量減少率で収縮ひずみが環境 N より小さくなったと考えられる。

(3) 実環境下における収縮ひび割れ性状

10×10×100cm の角柱供試体に発生した収縮ひび割れ状況を表 - 3 に示す。無筋コンクリート供試体では、水セメント比の違いによって収縮ひずみはさほど変わらなかったにもかかわらず、鉄筋コンクリートでは、全環境下において水セメント比 30%のコンクリートに発生したひび割れ本数は W/C=0.55 のコンクリートを上回った。低水セメント比のコンクリートの付着性状は高水セメント比のコンクリートと比較して卓越しており、鉄筋による内部拘束が大きいため、同じ収縮を呈した場合でも、早期に収縮ひび割れが発生し得る。このため、本実験において水セメント比 30%の鉄筋コンクリートにひび割れ発生が顕著に現われたと考えられる。

さらに、暴露された環境下条件の相違によってもひび割れ発生に違いが観察された。10×10×40cm の無筋コンクリート供試体の収縮ひずみが最も小さかった環境 SR ではひび割れがほとんど発生していない。一方で、無

表 - 3 収縮ひび割れ発生本数の経時変化

| | W/C | 乾燥時間 | | | 初期ひび割れ確認 |
|----|------|-------|-------|-------|----------|
| | | 110 日 | 180 日 | 280 日 | |
| S | 0.55 | 6 | 13 | 12 | 55 日 |
| | 0.30 | 18 | 22 | 22 | 26 日 |
| N | 0.55 | 0 | 4 | 5 | 83 日 |
| | 0.30 | 1 | 9 | 9 | 55 日 |
| SR | 0.55 | 0 | 0 | 5 | 228 日 |
| | 0.30 | 0 | 0 | 8 | 280 日 |

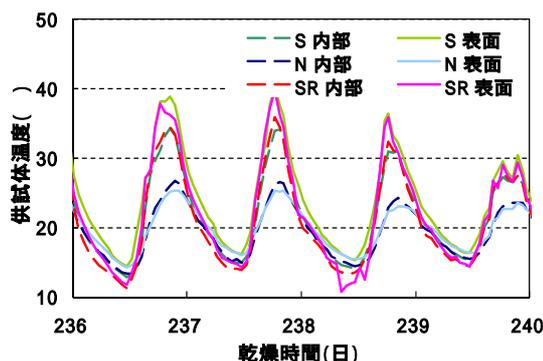


図 - 5 各環境におけるコンクリートの表面温度と内部温度

筋コンクリートの収縮ひずみの相違がさほど見られなかった環境 S と環境 N で比較すると、日射を受ける環境 S に暴露された供試体のみ多数のひび割れが早期から確認された。両環境に暴露された供試体はともに降雨を受けず収縮ひずみの差も小さいことから、環境 S では日射の影響によってひび割れ発生が促進されたと考えられ、この点について表面と内部の温度の観点から検討を加える。

図 - 5 に W/C = 0.30 のコンクリート供試体の表面温度と内部温度の変動を示す。環境 S では表面と内部の温度差が大きいために、温度ひずみに差が生じ、ひび割れが発生しやすかったと予想されたが、実際は、日射のあっても内部と表面の温度差はせいぜい 5 程度であった。温度ひずみ差にすると 50 μ 程度であり、ひび割れ発生に大きく影響するほど大きい差であるとは考え難い。そこで、最大温度に着目すると、環境 S で計測された温度は環境 N に置かれた供試体の温度を最大で 10 以上上回っている。したがって、環境 S は日射を受けることで温度が上昇し、コンクリート表面の乾燥、収縮が局所的に促進され、その結果ひび割れが発生しやすい状態であったと推測される。

以上を踏まえて収縮、収縮ひび割れ挙動に影響する環境作用を整理すると、降雨の有無は収縮挙動に大きく影響するが、日射は収縮にはさほど影響しない。しかしながら、コン

クリートの収縮ひずみが同等であっても、配合、日射によって収縮ひび割れの発生状況は異なる場合があることが分かった。

(4) 実環境下におけるクリープ挙動

最後に、日射および降雨がコンクリートのクリープに与える影響について述べる。図-6にクリープによってもたらされた単位応力当たりの時間依存変形の結果を示す。ここで、単位応力当たりの時間依存変形とは、クリープと収縮を合わせた変形、すなわち、荷重供試体から計測された全ひずみから、荷重時ならびにPC再緊張時に発生した弾性ひずみ差し引いたひずみを荷重応力で除した値である。収縮ひずみが含まれているものの、この時間依存変形がクリープ量に応じて大きくなると考えられる。図に示すように、低水セメント比である $W/C=0.30$ のコンクリートはクリープが小さく、各環境での相違が観察されにくかったため、 $W/C=0.55$ のコンクリートの実験結果をもとに以下考察を行う。

まず、日射の有無が異なる環境Sと環境Nで比較する。日射の影響を受ける環境Sが環境Nと比較して単位応力当たりの時間依存変形が大きくなっている。これより、クリープは日射によって増大することが分かる。一般に、温度上昇によってクリープは促進されるので、日射により温度が上がり環境Sでは時間依存変形が大きくなったと考えられる。また、日射により乾燥が進み比熱の大きい水の含有量が小さくなるため、コンクリートの温度は日射に敏感に反応、上昇し、変形が促進したと推察される。

次に、環境SRと環境Sで比較する。降雨を受ける環境SRのもとでは、降雨を受けない環境Sに比べ時間依存変形が小さくなっている。よって、収縮と同様に時間依存変形は、降雨によって抑制されることがわかる。

時間依存変形は、環境S、環境N、環境SRの順で小さくなっていることから、時間依存変形に対して、日射による促進効果よりも降雨の抑制効果の影響が大きいと推察される。

(5) まとめ

本研究をまとめると、以下ようになる。

コンクリートの収縮は、降雨の影響を強く受け、雨水の内部浸透によって収縮が大きく抑制されることが分かった。収縮に対する雨の影響は降雨量より降雨時間に依存し、雨季には収縮が持続的に抑制された。収縮ひび割れについては、降雨が収縮を抑制するため収縮ひび割れも抑制される一方で、日射は表面部分のコンクリートの局所的な乾燥を促進するため、収縮ひび割れを誘発することが分かった。無筋コンクリートの収縮が同等でも、配合、環境条件によっては鉄筋コンクリートの収縮ひび割れが発生しやすくなること

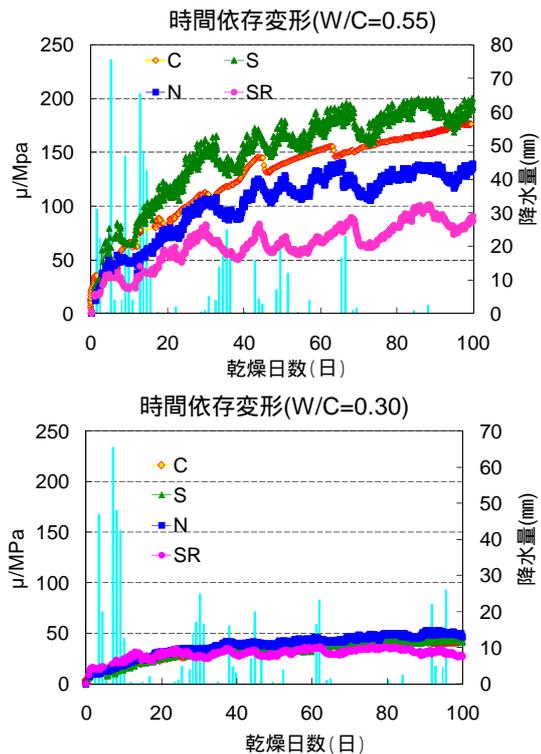


図-6 各乾燥環境下における時間依存変形の経時変化

分り、コンクリートの収縮のみから収縮ひび割れを判断することは危険であることが示された。

コンクリートのクリープは、収縮と同様に降雨の影響を強く受け、雨水の内部空隙への浸透によって大きく抑制された。日射は乾燥を促進するものの、収縮にはさほど影響を与えない一方で、クリープは日射による温度上昇によって促進され、降雨は受けず日射を受ける環境下の供試体のクリープが最も大きくなった。日射が照射されても降雨を受けた場合は、クリープが大きく抑制されたことから、日射によるクリープ促進より降雨浸透によるクリープ抑制の方が影響は大きいことが分かった。

また、本実験結果を東京大学で開発中のマルチスケール複合構成モデルと比較したところ、降雨、日射がない変動環境では、平均湿度、平均日温度の直線近似の境界条件で概ね収縮、クリープ挙動を再現できるものの、日々の降雨、日射の影響は温度、湿度の平均化では挙動を表現できなかった。数十年といった長期の収縮、クリープを予測する場合、日々の環境変動を入力することは膨大な時間がかかるから、降雨、日射を平均化してとらえる境界モデルなどが今後必要と考えられる。

以上のように、コンクリート構造物の耐久性低下をもたらす収縮、収縮ひび割れ、クリ

ープの挙動に、日射、降雨ともに大きく影響を及ぼすことから、境界条件に応じた適切な劣化予測を行うためには、これらの環境作用に留意する必要があることが分かった。しかしながら、こうした環境作用の変動が大きく取り扱いが難しいため、実務の予測式では、現状これらの環境作用を考慮していない。精緻な解析モデルにおいても、日々変動する日射、降雨の影響を境界として入力することは現実的ではなく、降雨の影響を平均湿度に反映させる、日射による表面温度の上昇を平均温度上昇で考える等の実務的な手法の提案、もしくは供用中の降雨量、日射量を入力することでその影響を考慮できる境界モデルの開発が今後必要であると考えられる。

降雨、日射といった実環境作用がコンクリートに影響を与えることは定性的には知られているものの、本研究のようにこれらの影響を定量的に比較検討した研究は国内外で少なく、長期的に計測を行った本成果は貴重であると認識している。今後は、塩分浸透、中性化、腐食といった他の劣化現象についても実環境作用の影響を検討し、本研究の最終目的である、実環境下におけるコンクリート構造物の劣化を定量的に予測するシステムの構築を目指す。

参考文献

- 1) C. Andrade, J. et al.: Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering, Cement and Concrete Research, Vol.29, pp.1249-1259, 1999
- 2) 福留和人, 下村匠: 時間依存変形を考慮したコンクリートの乾燥収縮モデル, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, pp.944-945, 1992

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, 篠崎裕生, 三上浩, 睦好宏史, 長期屋外乾燥させたPRC梁の曲げひび割れ性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 第30巻, pp.559-565, 2008, 査読有
大塚歩, 三浦千佳子, 浅本晋吾, 睦好宏史, 屋外暴露されたコンクリートの収縮性状に対する日射および降雨の影響, コンクリート工学年次論文集, 第30巻, pp.501-506, 2008, 査読有
浅本晋吾, 玉置一清, 大塚歩, 睦好宏史, 実環境作用に着目したコンクリートの収縮特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 第29巻, pp.681-686, 2007, 査読有

玉置一清, 睦好宏史, 浅本晋吾, 三上浩: 膨張剤およびビニロン短繊維を用いたコンクリートのひび割れ特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, 第29巻, No.1, pp.807-812, 2007, 査読有

[学会発表](計 2件)

大塚歩, 実環境作用下におけるコンクリートの収縮挙動に関する基礎的研究, 土木学会第62回年次学術講演会, 2007年9月12日, 広島大学

A. Ohtsuka, Influences of environmental factors on shrinkage behavior of concrete, 8th International Conference on Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures, 2008.10.2, Ise-shima, Japan,

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・助教

研究者番号: 50436333

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者