

## 論文 高強度マスコンクリートモデルの強度増進と温度・含水履歴

桂 修\*<sup>1</sup>・吉野利幸\*<sup>2</sup>・鎌田英治\*<sup>3</sup>

要旨：本研究は、前報[5]に引き続き、初期材齢に高温度履歴を受ける高強度マスコンクリート部材の強度増進性状と温度及び含水率分布の経時変化の関係を実部材を模擬した大型モデルを用いて実験により検討したものである。その結果、高温度履歴を受けた大型モデル内各点で材齢7日以後の強度増進がほとんど見られず、前報とは異なり長期材齢において4週標準水中養生強度を大きく下回るものが再現された。この原因として、初期材齢で部材中心部の相対湿度が低下しその後のセメントの水和反応が制限されることが示された。また、打設後温度が上昇するまでの時間が圧縮強度に影響を与える可能性が示された。

キーワード：高強度マスコン, 強度増進, 高温度履歴, 含水率分布, 電極法, 相対湿度

## 1. はじめに

マスコンクリートや単位セメント量の大きい高強度コンクリートでは、初期材齢にセメントの水和熱による高温度履歴を受け、その結果、ごく初期材齢の強度発現は良好であるが、長期材齢では強度増進が鈍化し、材齢13週のコア強度は4週標準水中養生強度を大きく下回るという報告がある[1]。この理由として、高温度履歴を受けたセメント硬化体では水和生成物の組織が粗くなり、材齢の経過にともなう細孔構造の緻密化が見られないなどの報告[2]や、普通セメントを用いたモルタルの実験から最高温度70℃以上での強度低下は、エトリンガイトのモノサルフェートへの転移にともなう構造的な変化による可能性があるとした水和生成物の化学組成からの報告もある[3]。また、温度勾配により水分の移動が起こることも知られている[4]。著者らは、前報[5]で高強度マスコンクリート部材内部の含水率の経時変化と平衡相対湿度の関係を実験により検討し、含水率に平衡する相対湿度の初期材齢における急激な低下により、その後のセメントの水和反応の進行が著しく停滞する結果、長期材齢における強度の増進が停滞する可能性を示した。

本研究は、初期材齢に高温度履歴を受ける高強度マスコンクリートの材齢7日から91日の強度増進性状、セメントの水和反応と部材内部の温度、及び、水分環境の経時変化の関係を明らかにすることを目的とし、大断面の柱を模擬した高強度マスコンクリートモデルにより実験的に検討したものである。

## 2. 実験の概要

## 2.1 実験計画及び調査

表1に実験計画表を示す。試験材齢は1、4、13週の3水準とした。試験体は初期材齢に高温度履歴を受け、部材内外及び部材断面内での水分の移動が考えられる高強度マスコンクリートモデル（以後大型試験体と記す）、大型試験体に追従した温度履歴を与えられ、封灌により内外の水分移動がない温度追従試験体、初期の高温度履歴を受けずに20℃で水中・封灌養生された比

\*1 北海道立寒地住宅都市研究所 生産技術部、工修（正会員）

\*2 北海道立寒地住宅都市研究所 生産技術部、工修（正会員）

\*3 北海道大学教授 工学部建築工学科、工博（正会員）

較用の標準試験体の3種類とした。

大型試験体は、マスコンクリート柱部材の一部を想定し、隅角部がなく水平断面内で等方性を持つ直径1m、高さ1.2mの円柱とし、上層（上面から200mm）、中層（中央部200mm）を測定対象とした。各層での供試体側面から20、110、225、500mmの各点に温度、含水率測定用の熱電対、電極を埋設した。コンクリート打設後、試験体側面を除く上下2面を断熱材、ポリフィルムで断熱・断湿した状態で養生し、側面の型枠を材齢4日で解体した後、各々所定の材齢まで室内で気中養生を行った。試験体は各材齢に1体とし、合計3体作製し、表面から110、225mmの点及び試験体中心部から切り取ったコアにより各層ごとに圧縮強度、細孔構造、結合水率の測定を行った。

温度追従試験体は、図1に示すシステムにより、大型試験体中層部断面内の各位置の温度に追従して封緘状態で養生を行ったものであり、形状は100φ×200mmのシリンダーとした。型枠はスチール製とし上面を鋼板とポリフィルムで封灌した。

コンクリートの調合を表2に示す。水セメント比は28%とし、セメントは普通ポルトランドセメント（比重：3.16）、細骨材は幌延産陸砂（比重：2.66 吸水率：1.19）、粗骨材は小樽見晴産砕石（比重：2.57 吸水率：1.76）とし、混和剤にはポリカルボン酸系の高性能A/E減水剤を用いた。コンクリートはレディーミクストコンクリートとし、大型試験体への打ち込みはバケットを用いた。

測定項目は温度、交流2電極法による含水率[6]、圧縮強度(JIS A 1107)、水銀圧入法による細孔構造、結合水率、及び、コンクリートの平衡含水率と相対湿度の関係とし、温度と含水率の測定は打設直後から材齢91日まで継続して行った。切り取ったコアによる圧縮強度試験体寸法は直径10cm、高さ20cmとした。

交流2電極法による含水率の測定は大型試験体のみを対象とし、含水率は同一のコンクリートを用い、材齢1週から13週まで封灌養生を行った検定用試験体に温度変化を与えながら電気抵抗の測定を行い、重回帰分析から得た実験式により求めた[6]。コンクリートの平衡含水

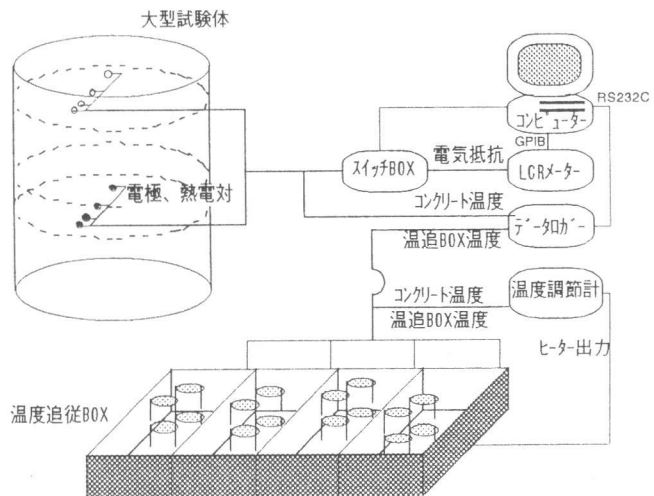


図-1 測定システムの概要

表-1 実験計画表

試験体種類	水セメント比 (%)	養生温度 (°C)	材令	養生条件
大型模擬試験体	28	部材温度	1週	温度履歴 気中温度
温度追従試験体			4週	温度追従封緘
標準試験体			13週	水中封緘
電極法検定用試験体	28	20	1週	20°C 封緘
			2週	
			4週	
			13週	

表-2 調合表

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m³)	絶対容積 (ℓ/m³)			重量 (kg/m³)			混和剤 (C×%)
			セメント	細骨材	粗骨材	セメント	細骨材	粗骨材	
28	43.3	174	197	264	345	623	702	921	1.7

率と相対湿度の関係を測定するための試料は大型試験体から切り取ったコアより得た厚さ約7mmの薄片とし、20℃の水中で48時間吸水させた後、温度を20℃、相対湿度を80%に調湿したデシケーター中で質量が恒量になるまで(4~5週)静置した。質量測定後105℃で乾燥を行い、質量変化から求めた含水率を各相対湿度での平衡含水率とした。

### 2.2 測定システム

測定システムの概要を図1に示す。大型試験体に熱電対、電極を埋設し、測定位置の温度、電気抵抗をコンピューター、データロガー及び、電気抵抗測定装置(LCRメーター)を用いて自動測定・記録を行った。また、温度追従試験体は温度追従装置により大型試験体の各測定点温度に対応する温度で養生を行った。

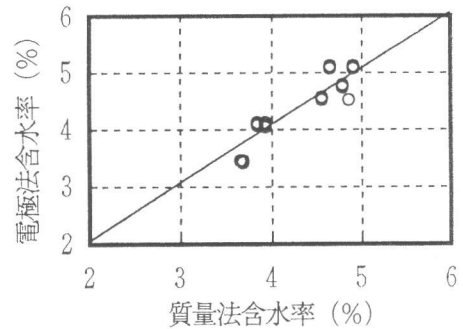


図-2 電極法含水率と質量法含水率

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 温度と含水率の経時変化

図2に電極法含水率と質量法含水率の関係を示す。質量法含水率は、電極法含水率算出に用いた検定用試験体の105℃絶乾質量から求めたもので、両者はよく対応しており、残差の標準偏差は0.24%であった。

大型試験体上層部及び中層部各測定点の温度と交流2電極法による含水率分布の経時変化を表面からの距離別に図3、図4に示す。部材内各点の温度は打設後約5時間から急激に上昇し、部材中心部では打設後約18時間で最高温度に到達した。最高温度、温度上昇勾配は試験体の中心部ほど大きく、最大値は中層部中心で各々96.4℃、17.0℃/hr.であった。図に示すように温度と含水率が急激に変化し始める材齢は対応し、また、温度上昇勾配の減少とともに含水率の変化も緩慢となった。この段階までの含水率の変化は、主としてセメントの水和反応における加速期の急激な反応による化学的な水の消費によるものと考えられる。部材断面内の含水率分布では、初期材齢において中心部の含水率が表面部と比較して低くなり、部材内に含水率勾配が生じた。材齢4日で型枠を解体した後表面部の含水率が比較的大きく低下したことを除き、長期材齢に至るまで中心部が最も低い

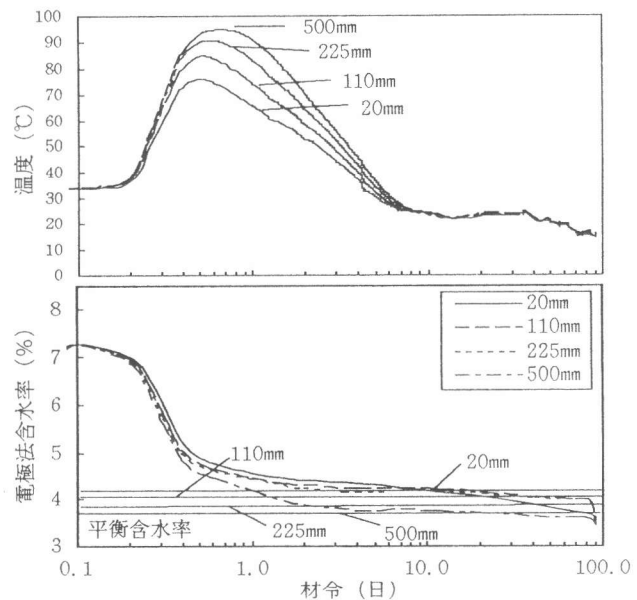


図-3 温度、含水率経時変化(上層部)

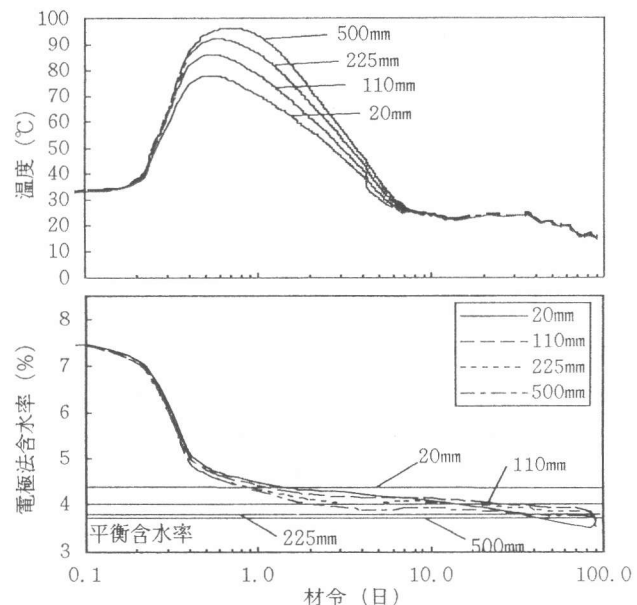


図-4 温度、含水率経時変化(中層部)

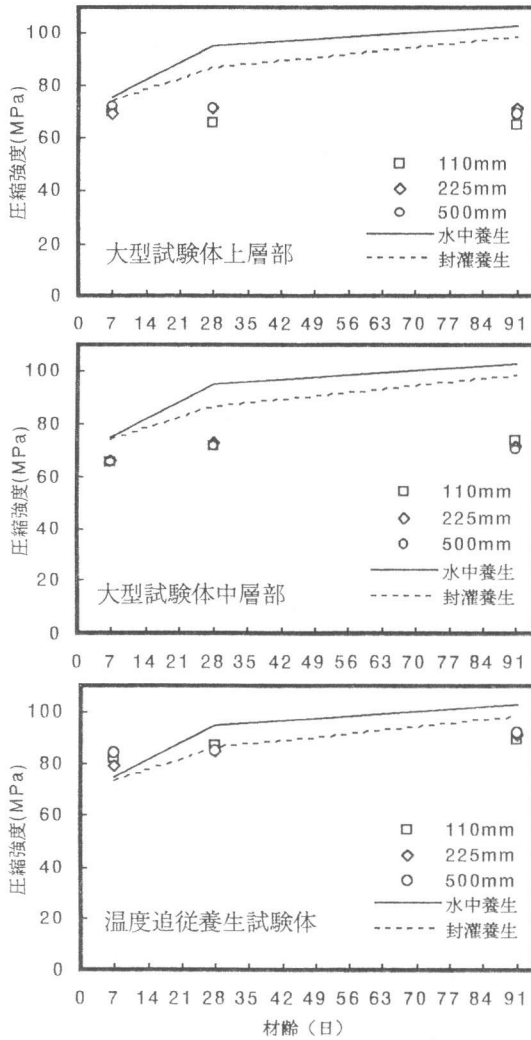


図-5 圧縮強度の経時変化

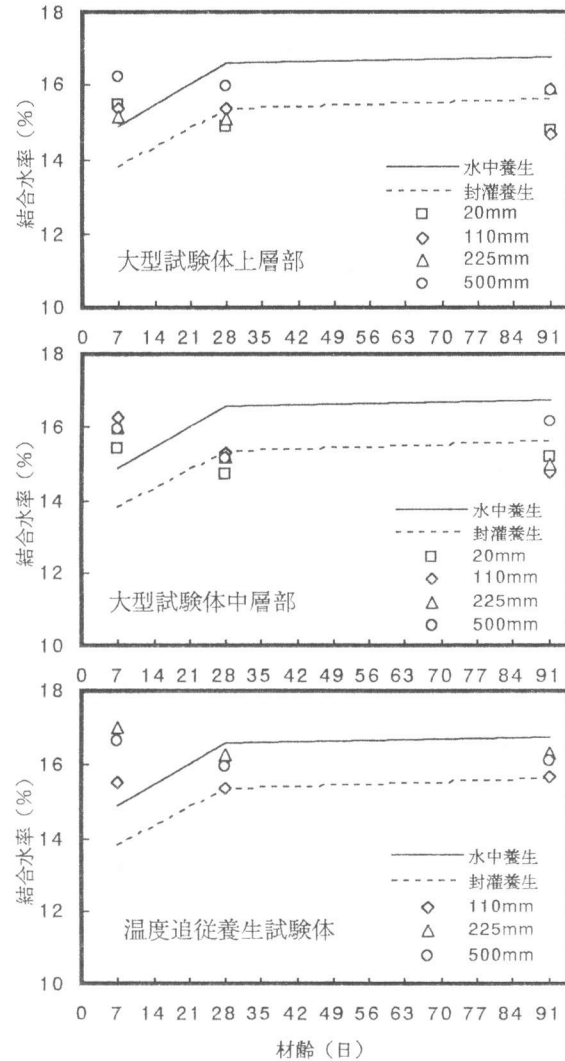


図-6 結合水率の経時変化

含水状態を保ちながら推移した。

セメントの水和反応は相対湿度80%程度で停滞する[7]ことから、RH80%に対応する平衡含水率を図2及び図3中に表面からの距離ごとに示した。大型試験体中各点の含水率は材齢7日までは相対湿度80%に対応する平衡含水率程度まで低下し、その後の変化は非常に少ない結果となった。本実験の結果からは水和反応による水の消費に起因する含水率の低下と乾燥による含水率の低下を分離することはできないが、材齢7日以後の大型試験体内の水分条件は少なくともセメントの水和反応の進行に十分な条件ではないと考えられる。

### 3.2 圧縮強度

図5に、大型試験体上層及び中層の各測定位置から切り取ったコア試験体と温度追従養生試験体の圧縮強度の経時変化を20℃標準水中養生及び封灌養生を行った試験体の圧縮強度と対比して示す。大型試験体の材齢7日における圧縮強度は高温度履歴を受けセメントの水和反応が促進されていることが予測されるにもかかわらず標準養生を行った試験体の圧縮強度値よりも低い値となった。材齢による変化では、20℃標準水中養生及び封灌養生を行った試験体が材齢1週から13週にかけて強度が増進しているのに対し、大型試験体では中層部で材齢7日から28日の間にわずかな強度増進が見られる以外は顕著な強度増進は認められず、全体的には材齢7日以後の強度

増進がほとんど認められない結果となった。大型試験体各点の材齢91日での圧縮強度は、標準水中養生を行った試験体の材齢28日における圧縮強度を大きく下回る結果となり、上層部では72%、中層部で75%程度の強度値となった。一方、各層内の表面からの距離による強度の変化はほとんど認められず、また、上層、中層での差は明らかなものではなかった。

高温履歴を受け、外部との水分の移動が無視される温度追従試験体では材齢7日の圧縮強度が標準養生試験体の強度を上回るものの、その後の圧縮強度の増進は緩慢であり、材齢91日では標準水中養生試験体の材齢28日における強度を若干下回る結果となった。

### 3.3 結合水率、細孔構造

図6に大型試験体及び温度追従試験体の結合水率の経時変化を標準養生試験体と対比して示す。大型試験体、温度追従試験体ともに材齢7日の結合水率は図中実線及び破線で示す標準養生を行った試験体の結合水率を上回っているが、その後の材齢の経過にともなう顕著な増加は認められない。温度追従試験体では大型試験体と比較して結合水率が高い傾向が見られ、これは封灌状態で養生していることにより外部への水分の逸散がなかったためと考えられるが、データのばらつきを考慮すると明らかとは言えない。

図7に大型試験体及び温度追従試験体の細孔構造の経時変化を単位セメントペースト量あたりの細孔量である有効細孔量を指標として示す。大型試験体中層部で材齢7日から28日における有効細孔量の減少が見られるほかは大型試験体、温度追従試験体ともに材齢の経過にともなう明らかな変化は認められない結果となった。

以上に示したように、大型試験体の圧縮強度は材齢7日以後は大きな変化はなく、含水率、結合水率、有効細孔量もまた、材齢の経過にともなう変化が明らかではないことから、強度増進の停滞は部材内部の水分不足によりセメントの水和が停滞することが原因と考えられる。

一方、材齢7日における大型試験体では、結合水率が標準養生試験体より高く、また、有効細孔量が同等であるにもかかわらず圧縮強度は低い値を示しており、圧縮強度をセメントの水和反応の進行程度や細孔構造の変化だけで説明するのは困難と考えられる。前報[5]では、本実験の結果とは異なり、部材から切り取ったコアの強度は標準水中養生を行った材齢28日の強度を上回る結果が得られている。本実験と前報[5]の温度履歴の比較を部材中心部について図8に示す。図中実線が本実験の結果であり、両者の最高温度、温度上昇勾配は同等であるが、本実験結果では打設から温度が上昇し始めるまでの時間が約2時間と短い点に相違がある。この理由として、使

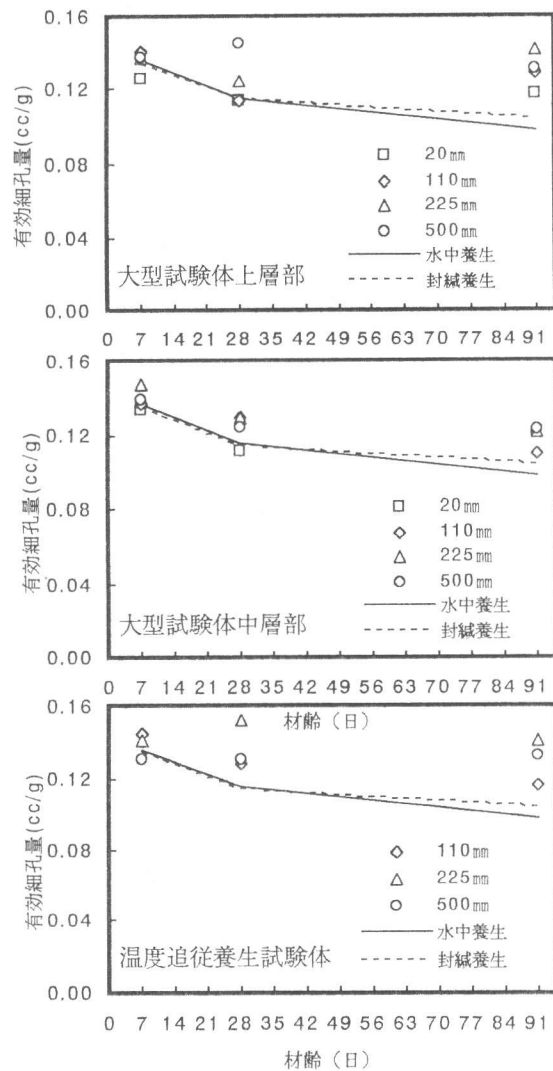


図-7 有効細孔量の経時変化

用した高性能A E減水剤が異なり、今回の実験では遅延効果のないポリカルボン酸系高性能A E減水剤を使用した結果、凝結時間が早くなったためと考えられる。両実験の範囲では、現段階で理由は明らかではないものの、蒸気養生を行ったコンクリートの圧縮強度が前置き時間に依存する[8]のと同様に、高温度履歴を受ける高強度マスコンクリートの圧縮強度が打設後温度上昇が始まるまでの時間に依存する可能性が示唆されているものと考えられる。

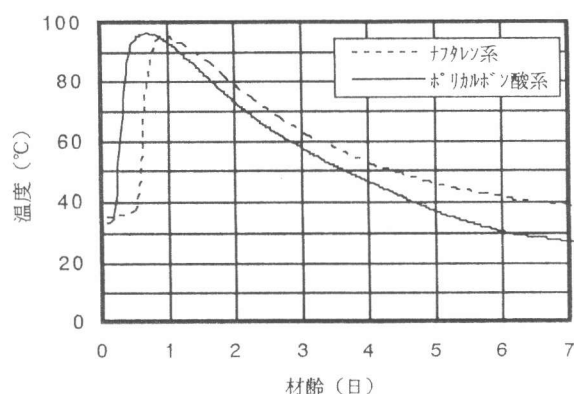


図-8 温度履歴の相違

#### 4. 結論

本研究の結果は以下に要約される。

- (1) 高強度マスコンクリートを用いた大型試験体内部の温度、含水率分布の経時変化を測定した結果、材齢約1日で中心部と表面部に大きな温度差が生じ、含水率の分布では中心部が最も乾燥した状態で推移することが示された。
- (2) 高強度マスコンクリート部材中心部は、比較的早期材齢から含水率が低下し、これに伴うコンクリート内部の相対湿度の低下により、セメントの水和反応の進行が停滞する。その結果、材齢7日以後の強度増進が停滞するものと考えられる。
- (3) 高温度履歴を受けた高強度マスコンクリートの強度は最高温度や温度上昇勾配の影響、及び、セメントの水和反応の進行程度だけで説明されるものではなく、打設後温度上昇が始まるまでの時間に依存する可能性があり、今後の課題と考えられる。

#### 参考文献

- [1] 枘田佳寛・阿部道彦・松本雅之：高強度コンクリートを用いた構造体コンクリートの強度管理方法に関する考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 837-838、1991
- [2] 地濃茂雄：コンクリートの強度発現性状におよぼす温度履歴条件（20～90℃）の影響、日本建築学会構造系論文報告集第337号、pp. 8-14、1984.3
- [3] 坂部大、名和豊春、大久保正弘：高ビーライト系セメントを用いたモルタルの蒸気養生における強度発現性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 17、No. 1、pp. 469-474、1995
- [4] 松本衛：建築の吸湿問題とその現象の解析、日本建築学会環境工学委員会、熱環境運営委員会第21回熱シンポジウム、pp. 1-20、1991
- [5] 住学、桂修、鎌田英治：高強度マスコンクリートモデル内部の温度履歴、含水率分布と長期強度、コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 17、No. 1、pp. 1043-1048、1995
- [6] 桂修・吉野利幸・田端雅幸・鎌田英治：交流2電極法によるコンクリート中の含水率測定についての理論的検証、コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 16、pp. 735-740、1994
- [7] 住学・桂修・鎌田英治：普通ポルトランドセメントの水和反応の進行程度に及ぼす相対湿度の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1 材料施工、pp. 843-844、1995
- [8] 江本幸雄、大和竹史、添田政司：コンクリートの強度と細孔径分布に及ぼす蒸気養生条件の影響、セメント技術年報 38、pp. 269-272、1984