論文　高強度コンクリートの構造体内部での含水率の変化と強度発現性に関する研究

佐藤　幸恵[*1]・桝田　佳寛[*2]・河上　浩司[*3]・鹿毛　忠継[*4]

要旨：初期材齢に高温履歴を受けたコンクリートは，長期の強度発現が停滞する傾向にある。しかし，高強度コンクリートやマスコンクリートでは，部材中心部の強度が表面部よりも大きい場合があり，構造体中での水和反応に必要な水分の挙動を考慮する必要がある。本研究では，模擬部材中での初期材齢の含水率の挙動を実験によって明らかにすると共に，圧縮強度との関係について検討を行った。その結果，部材中心部では材齢の初期に受ける高温履歴により急激に水和が進行し，水分を多く消費するため，水分が部材中心部に集まる傾向がみられた。

キーワード：高強度コンクリート，構造体，含水率，強度発現

1.　はじめに

近年，高層集合住宅等の高層建築物に高強度コンクリートを使用する例が増加している。高強度コンクリートは，水和熱の蓄積によって受ける高温履歴の影響により，部材中心部では長期材齢における強度発現が期待できないといわれている。しかし，筆者らは，過去に行われた構造体コンクリートの強度発現性状を調査し，端部に比べ中心部のコア供試体強度が高いという結果も多数存在することを明らかにした[1)]。この傾向は，高強度になるにつれ，最高温度が高くなるにつれて多数現れるようになる傾向がみられたが，明確にはわかっていない。構造体中での強度発現に影響を及ぼす因子としては，温度条件が最も支配的ではあるが，構造体内部では水分の影響も無視できないと考えられる。既往の研究にもいくつかの構造体内部での水分移動を扱ったものが存在する[2)]が，材齢の初期に高温履歴によって促進された中心部の強度発現が，表面部の強度発現より最終的に大きくなるという現象を説明するには至っていない。そこで，本研究では，強度レベルを三段階に設定したコンクリートを用い，実大構造物を模した模擬部材を作製し，材齢の初期からの模擬部材中での質量含水率（以下，含水率という）の分布について，セラミックセンサを用いた電極法による含水率の測定[3)]を行い，同一部材から採取したコア供試体と軽量鋼製型枠にコンクリートを打ち込んで部材内に埋設した供試体の含水率および圧縮強度の関係を調べることとした。

2.　実験方法

表－１に要因と水準を，**表－２**に計画調合を示す。使用材料および供試体寸法は前報[4)]と同様であり，セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。

表－1 実験の要因と水準

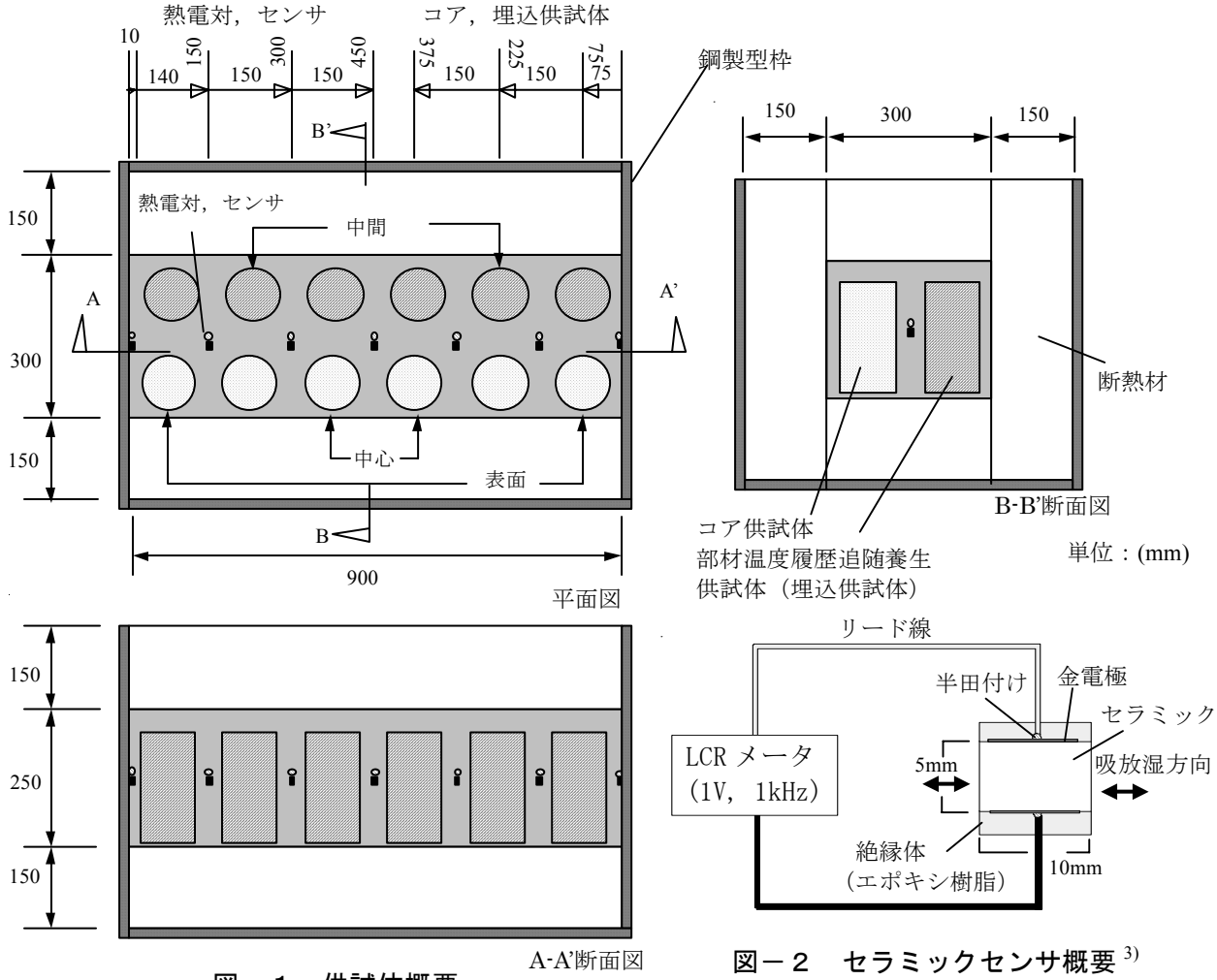
要因	水準
W/C(%)	30,40,60
測定項目	温度，電気抵抗，圧縮強度
供試体の種類	部材コア供試体 部材温度履歴追随養生供試体 標準養生供試体 20℃封かん養生供試体
部材位置	表面，中間，中心
材齢(日)	3※, 7, 28, 91

※水セメント比 60%は 7，28，91 日

*1　宇都宮大学大学院　工学研究科　工博　（正会員）
*2　宇都宮大学教授　工学部建設学科　工博　（正会員）
*3　三井住友建設（株）　技術研究所　工修　（正会員）
*4　国土交通省　国土技術政策総合研究所　Ph.D.　（正会員）

表－２　計画調合

W/C (%)	目標ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	目標Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				混和剤	
				W	C	S	G	種類	添加率
30	23	3.0	43.8	160	533	724	963	高性能AE減水剤	C×1.2%
40	18	4.5	40.6	183	458	657	995	AE減水剤	C×0.4%
60	18	4.5	45.8	175	292	813	995	AE減水剤	C×0.4%



図－１　供試体概要

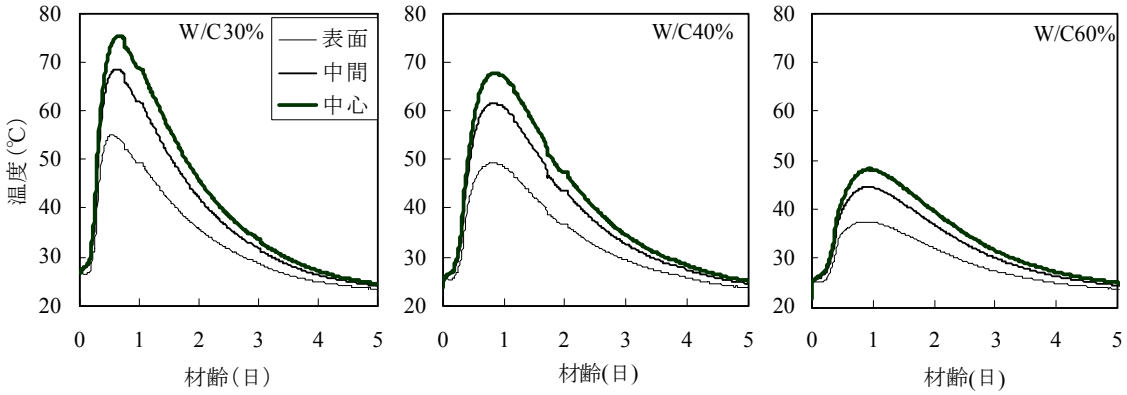
図－２　セラミックセンサ概要 [3)]

図—１に供試体概要を示す。図中の各位置に熱電対とセラミックセンサを埋設し，それぞれ温度履歴と含水率を測定した。なお，模擬部材の両端面は材齢７日で脱型し，自由乾燥状態とした。セラミックセンサは，**図－２**に示す形状で，φ10×5mm の円柱状のセラミックに金電極を両平面に焼き付けたもので，LCR メータを用いて，1V，1kHz の条件で交流電流を流した時のセラミックセンサの電気抵抗を材齢１日から測定した。電気抵抗から含水率への変換は，同時に作製した小型供試体を用いて電気抵抗と含水率の関係および電気抵抗の温度依存性に関する校正曲線を作成して行った。なお，コンクリートの供試体からも圧縮試験後に割裂した供試体を 105℃の乾燥機で恒量になるまで加熱し，加熱後の質量差から計算によって含水率を求めた。

3.　実験結果と考察

3.1　温度分布

熱電対の測定位置とコア供試体，温度履歴追随養生供試体（以下，埋込供試体という）採取位置にずれがあるので，各供試体の温度履歴は，供試体の両隣の位置にある熱電対の温度履歴の

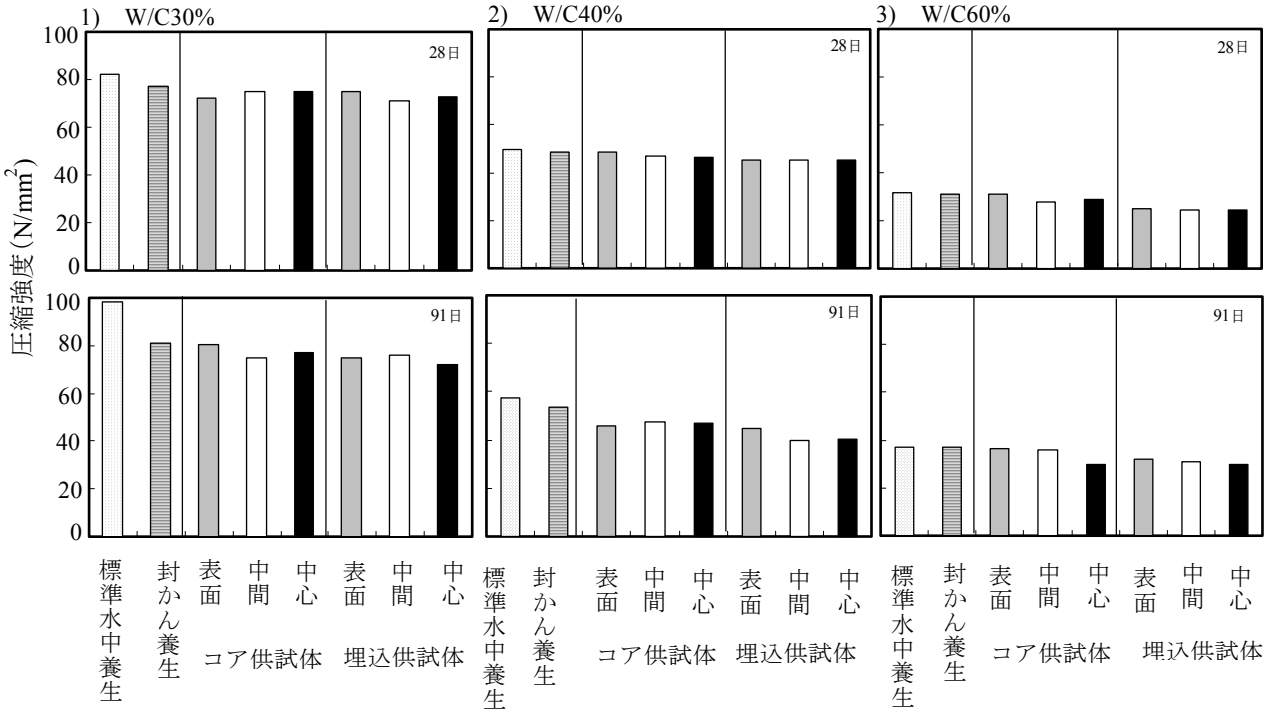


図－３　温度履歴測定結果

測定結果の平均とみなすこととした。各位置における温度履歴を**図－３**に示す。図より，水セメント比が小さいほど部材中での温度差が大きくなる傾向があった。

3.2 温度分布と強度発現の関係

図－４に各調合の材齢 28 日および 91 日における強度発現の関係を示す。水セメント比 30%で標準水中養生供試体強度とコアおよび埋込供試体強度の差が最も大きくなっており，単位水量が少ない高強度コンクリートでは，養生水の供給の有無によって強度発現に大きな差が生じ易いことがわかる。また，各調合とも，材齢 28 日では各供試体ともそれほど圧縮強度に差は生じていないが，材齢 91 日になると，水セメント比に関わらず，部材内の水分移動や乾燥の影響のない埋込供試体において中心部の圧縮強度が低い傾向にあり，材齢の初期に受けた高温履歴の影響を受けていることがわかる。中心部における強度発現の停滞は，水セメント比が大きくなるほど顕著に現れ，水セメント比 30%の高強度コンクリートでは，中心部における強度発現の停滞がそれほど無く，他の部位の供試体強度ともそれほど差はなかった。コア供試体と埋込供試体の圧縮強度の違いでは，強度発現傾向についてはそれほど差がないものの，全体としてコア供試体強度の方が高い傾向があった。以上



図－４　圧縮強度試験結果

より，コア供試体と埋込み供試体と比較して，最も高温履歴を受けた中心部の強度も，同一の温度履歴を受けたにもかかわらず，コア供試体強度の方が高い結果となっており，模擬部材内での水分の移動が強度発現に関与しているのではないかと考えられる。

3.3　強度発現に及ぼす水分の関係

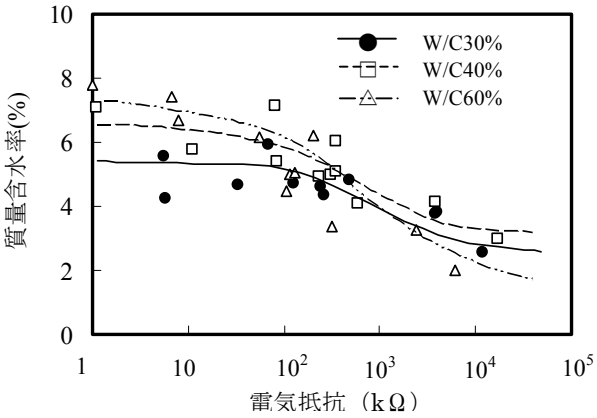
図－５に，電気抵抗と含水率の関係を示す。また，温度依存性についてキャリブレーションを行った結果，各温度における電気抵抗（R_T）を 20℃（293K）における電気抵抗（R_{293}）に補正する際の補正式を以下のように求めた[3)]。

$$R_{293} = \frac{R_T}{\exp\left\{5.02\times10^3\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{293}\right)\right\}} \qquad (1)$$

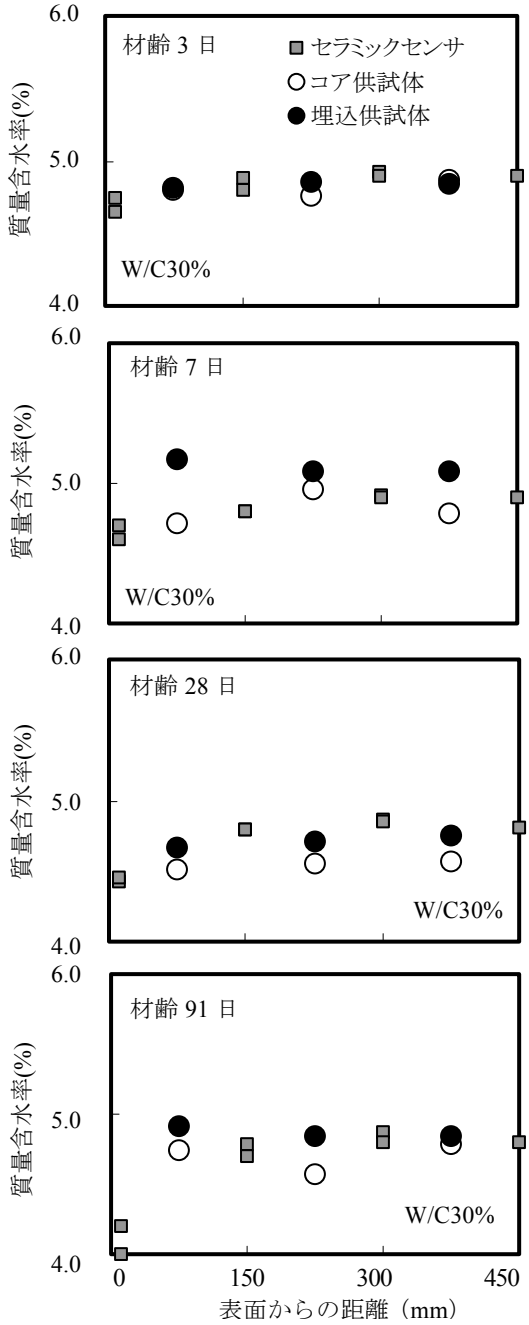
ここに，T：絶対温度（K），

R_T：T（K）における電気抵抗（kΩ）

式（１）を用いて 20℃における電気抵抗に補正し，**図－５**から含水率に変換した結果から，水セメント比 30%におけるセラミックセンサで測定した含水率と各材齢でのコア供試体および埋込供試体から測定した含水率との対応を**図－６**に示す。センサによる含水率はコア供試体の含水率と対応している。**図－６**より，両者の関係はほぼ類似し，セラミックセンサを用いて部材内の含水率を十分に評価できているものと考えられる。なおセンサの表面部分の含水率の低下が著しく大きい。これは材齢 7 日以降に脱型したことによる乾燥の影響によるものである。コンクリートが乾燥の影響を受けるのは，既往の文献[5)]より，水セメント比などによって異なるが，表層部分からおおむね 50mm 程度であると指摘されており，10mm 位置と表面部供試体採取位置である 75mm 位置では含水率に差が生じていると考えられる。**図－７**に，模擬部材内での材齢 7 日までの含水率の経時変化を示す。材齢 7 日までは,部材は封かん状態であるので，表面部での乾燥は考えなくて良い。



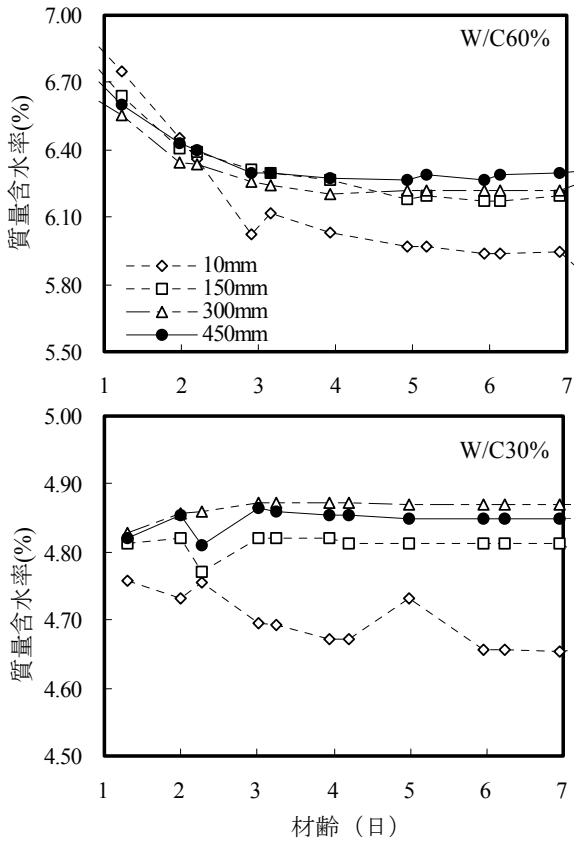
図－５　電気抵抗と含水率の関係



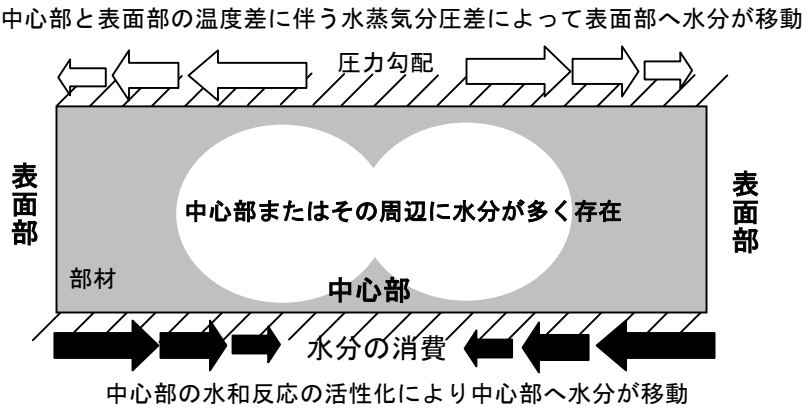
図－６　コア，埋込供試体の質量含水率とセラミックセンサーによる質量含水率との対応

センサによる測定結果の材齢の初期からの含水率分布の傾向は，ごく表面部以外は含水率に差はあまりないようにみられるが，水セメント比 60%において，材齢 7 日までの間では，高温履歴を受けている間に，中心部または中心部付近の含水率が高くなる傾向にあった。W/C30%では，中心部および中心部付近の含水率は共に高くなった。表面部の乾燥を考慮しなくてよい状態でも，全ての水セメント比において概ね中心部の含水率が高くなる傾向があった。部材が封かん状態に保たれている状態でもこのような結果となっており，また，コア供試体の中心部の強度発現がそれほど停滞しなかったことから，部材内部では，水分は材齢の初期における急激な水和反応の進行によって中心部で特に水が多く消費されることになり，周囲の水分も中心部に移動するのではないかと考えられる。一方で，水蒸気分圧差によって，水分が表面部に移動する現象も生じるといわれており [2)]，材齢の初期には部材中で水分は非常に複雑な挙動を示していると考えられる。この状況を模式的に示すと**図—８**のようになる。中心部に向かう水分の系と，表面部へ向かう水分の系が両方存在するが，水分の挙動がどちらの系に大きく影響を受けるかは，調合，使用材料，環境条件等に左右され，複雑な挙動を示すと考えられる。また，部材内部の高温がピークを過ぎると徐々にそれぞれの系も駆動力が小さくなり，加えて水和反応の進行で組織が密実となってくるため，次第に水分の移動が拘束され，その結果水分は中心部あるいはその周囲に残存することになるのではないかと考えられる。

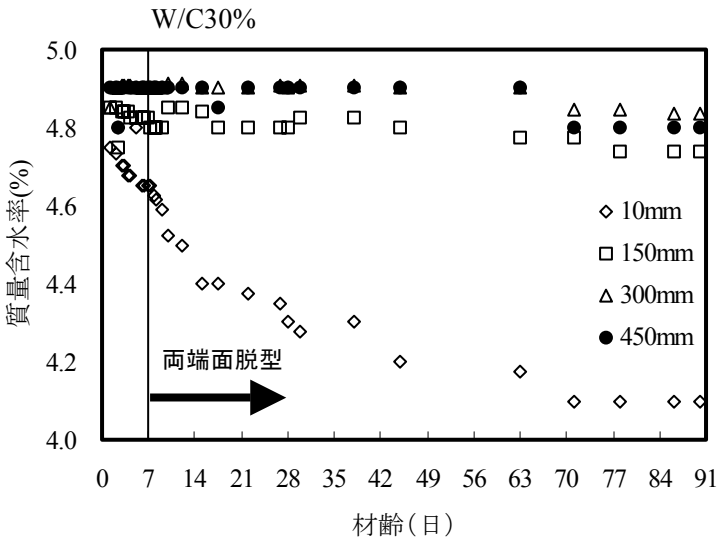
図—９に，水セメント比 30%の材齢 91 日までの含水率の経時変化を示す。全体的に，材齢 7 日以降では，含水率の変化はほとんどないが，長期材齢で含水率が減少傾向にあり，内部乾燥や水和反応に消費されたことによる含水率の低下が起こっていると予想される。全体としては乾燥の影響の少ない中心部ではある程度高い含水率のまま推移した。強度発現と比較すると，コア供試体を採取した位置では同じような傾向の含水率の推移であっても長期材齢での強度発現が表面部は大きく



図—７　含水率の経時変化



図—８　初期材齢におけるコンクリート部材内での水分の挙動模式図



図―９　含水率の経時変化

なり，中心部では強度発現の停滞が見受けられる。これは，部材内部ではコンクリートの組織が異なるために，組織中の水分の存在状態が異なることが影響していると考えられる。

4. まとめ

本研究では，初期高温履歴を受けるコンクリート模擬部材中での含水率分布の測定を行い，その変化，挙動を検討し，強度発現特性との関係を考察した。その結果，以下のことが明らかとなった。

1）コア供試体と埋込供試体の部材内の位置での強度発現の比較から，高強度コンクリートに及ぼす温度履歴の影響は，最高温度が高いにもかかわらず水セメント比が小さいコンクリートほど強度発現に及ぼす影響は小さい。

2）部材中で，同一温度履歴を受けたにもかかわらず，部材中に封かん状態で埋め込んだ温度追随供試体の圧縮強度よりも，コア供試体の圧縮強度の方が高い。

3）部材中での水分は，材齢初期の急激な水和反応の進行および高温履歴による圧力勾配によって複雑な挙動をしていることがわかった。

謝辞

セラミックセンサを用いた含水率測定に関して，湯浅昇氏（日本大学生産工学部助教授）に御指導頂きました。また，実験を行うにあたり，西本好克氏（三井住友建設　技術研究所），皆川淳君（当時宇都宮大学修論生），大沼薫春君，小泉信一君（当時宇都宮大学卒論生）の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1）佐藤幸恵，桝田佳寛：高強度コンクリートの構造体中での圧縮強度の変動，日本建築学会構造系論文集，第 562 号，pp.9-14，2002.12

2）たとえば住学，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.469-474，1995

3）湯浅昇，笠井芳夫，松井勇：埋め込みセラミックセンサの電気的特性によるコンクリートの含水率測定方法の提案，日本建築学会構造系論文集，第 498 号，pp.13-20,1997.8

4）皆川淳，佐藤幸恵，桝田佳寛，河上浩司：構造体中でのコンクリート強度発現の変動に関する基礎的実験，日本コンクリート工学協会年次論文集，Vol．24．No．1，2002.6

5）湯浅昇，笠井芳夫，松井勇：乾燥を受けたコンクリートの表層から内部にわたる含水率，細孔構造の不均質性，日本建築学会構造系論文集，第 509 号，pp.9-16，1998.7