

論文 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

住 学*¹・桂 修*²・鎌田英治*³

要旨：本研究では高強度マスコンクリートを想定したモデル部材により、モデル内部の温度履歴、含水率分布の経時変化を測定し、モデル部材の温度に追従させた試験体およびモデル部材から採取したコア試験体の長期材齢強度との関係を検討した。その結果、高温度履歴による長期強度増進の鈍化が見られるものの、4週標準水中養生強度との比較で、強度が大きく下回るものは再現されなかった。しかし、モデル内部の含水率と相対湿度の関係を検討した結果、中期材齢以降、部材中心部の相対湿度が低下し、水和反応が進行しにくい状態となり、それが長期強度増進の鈍化の原因となる可能性を示した。

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

1. はじめに

コンクリートの強度増進には、養生温度、材齢、水分の供給条件が影響を及ぼす。十分な水分の供給がある条件では材齢の経過に伴いセメントの水和が進行し、温度が高くなるとさらに水和は促進される。しかし、マスコンクリートのような大断面部材や単位セメント量の大きい高強度コンクリートでは、水和熱の蓄積により水和初期に高温度履歴を受けることになり、初期材齢では強度発現は良好であるが、長期材齢時に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に比べ大きく下回るという報告がある [1]。通常、このような強度増進の停滞は上昇温度との関係で述べられることが多く、水和生成物では組織が粗くなり、初期材齢以降の細孔構造には材齢による変化が見られないなどの報告がある [2]。このような部材では水和初期に部材内に温度分布が生じ、温度勾配を駆動力とした表面部への水分移動が起こる [3]。ここで、部材内の水分移動が部材中心から表面に向かうと仮定すると、中心部では水和反応に必要な水分が十分得られない状態となり、部材中心部における長期強度増進の鈍化につながる可能性がある [4]。

本研究は、初期材齢で水和発熱による高温度履歴を受ける高強度マスコンクリートを対象に、その温度履歴、含水率分布の経時変化と長期強度の関係をモデル部材を作製して、実験的に検討したものである。実験は、練り上がり温度、養生温度を3水準とした高強度マスコンクリートモデル（以下、大型試験体）、養生温度を大型試験体内部の温度履歴に追従させた温度追従試験体により行い、大型試験体では内部の温度分布（高温度履歴）、電極法による含水率分布 [5] の経時変化を測定し、長期強度増進との関係を検討した。さらに、コンクリートの平衡含水率と相対湿度の関係を求め、大型試験体内部の含水状態をセメントの水和反応と関連づけて検討した。

2. 実験の概要

2.1 実験計画および調査

表1に実験計画表を示す。大型試験体はマスコンクリートの一部を想定したもので、温度履歴

*1 北海道大学大学院 工学研究科建築工学専攻（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）

と含水率分布の影響を受けるのに対し、温度追従試験体は封緘状態で養生しており、温度履歴のみの影響を与えたものとした。

コンクリートの水セメント比は28%とした。調合表を表2に示す。使用材料は、セメントは普通ポルトランドセメント（比重：3.16）、細骨材は鶴川産陸砂（比重：2.7 吸水率：1.52）、粗骨材は常盤産碎石（比重：2.65 吸水率：2.79）とし、混和剤にはナフタレン系の高性能A E減水剤を用いた。

(1) 大型試験体

寸法はD500×L600×H200 (mm)とした。コンクリートの練り上がり温度は20、27.5、35℃とし、試験体の前面を除く5面を断熱材、ビニルシートで断熱・断湿した状態で練り上がり温度と同じ温度、R.H.60%の条件で養生した。温度および電気抵抗の測定は、表面から15、110、225、500 (mm) の位置で行い、温度履歴と電極法による含水率 [5] を求めた。また、この大型試験体では、材齢13週でコア抜きし、圧縮強度を測定した (JIS A 1107)。さらに圧縮強度試験後の供試体を厚さ約7mmにスライスし、平衡含水率と相対湿度の関係を求めた。

(2) 温度追従試験体

温度追従試験体は、図1に示すように、大型試験体の各測定位置の温度履歴を与え、封緘状態で養生を行ったものである。この試験体では所定の材齢（4週、13週）において圧縮強度試験（JIS A 1108）を行った。

(3) 平衡含水率、結合水率と相対湿度

コンクリートの平衡含水率と相対湿度の関係は、コア抜き試験体からのスライス片によって求めた。スライス片は20℃の水中で48時間吸水させた後、相対湿度をそれぞれ66、75、80、85、90、95、100%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）放置し、その時点での重量法含水率を求め、その相対湿度での平衡含水率とした。また、同じ水セメント比のセメントペーストを作製し、練り上がり後、材齢1日で2日間D-Dry乾燥させ、各相対湿度に調湿したデシケーター中に4週間放置した。その後、600℃強熱減量により結合水率を測定した。調湿した相対湿度はそれぞれ0、66、75、80、85、90、95、100%である。

表1 実験計画表

試験体種類	練り上がり温度 養生温度 (℃)	コア抜き位置 温度追従位置 (mm)	材齢	養生条件
大型試験体	20	15	13週	20、27.5、35℃ R. H. 60%
温度追従 試験体	27.5 35	110 225 500	4週・13週	温度追従封緘
標準試験体	20	—	4週・13週	水中*・封緘

*4週のみとする

表2 調合表

W/C (%)	S/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積 (ℓ/m ³)			重量 (kg/m ³)			混和剤*
			C	S	G	C	S	G	
28	44.1	174	197	260	329	623	670	869	2.0

*使用量はセメントの重量%とする

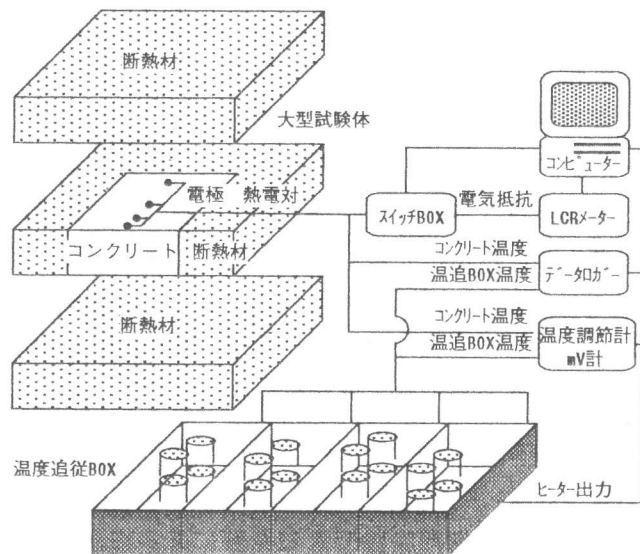


図1 システム概要図

2. 2 測定システム

図1に測定システムを示す。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を用いて自動測定するとともに、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追従養生を行った。

3. 実験結果と考察

3. 1 温度履歴と含水率

大型試験体各測定点の温度履歴を図2に、各測定点で得られた温度の特性

値を表3に示す。部材内部の温度は材齢0.4~0.5日で急激に上昇を始め、材齢約1日で最高温度に到達する。最高温度、温度上昇勾配は試験体の中心部ほど、また練り上がり温度、養生温度が高いほど大きい。また、温度と含水率が急激に変化し始める材齢は各温度ともほぼ一致した。

表3 温度特性

Series	測定位置	15mm	110mm	225mm	500mm
SeriesA (20°C)	練り上がり温度 (°C)	22.7	22.7	22.7	22.7
	最高温度 (°C)	60.7	70.2	77.5	80.2
	上昇温度 (°C)	38	47.5	54.8	57.5
	温度上昇勾配の最大値*	10.2	11.4	12.6	13.2
SeriesB (27.5°C)	練り上がり温度 (°C)	27.1	27.1	27.1	27.1
	最高温度 (°C)	67.5	78	86	88.8
	上昇温度 (°C)	40.4	50.9	58.9	61.7
	温度上昇勾配の最大値*	11.4	13.8	13.8	14.4
SeriesC (35°C)	練り上がり温度 (°C)	34.6	34.6	34.6	34.6
	最高温度 (°C)	74.9	86.8	93.8	95.6
	上昇温度 (°C)	40.3	52.2	59.2	61
	温度上昇勾配の最大値*	15	16.8	16.8	17.4

* (°C/hr.)

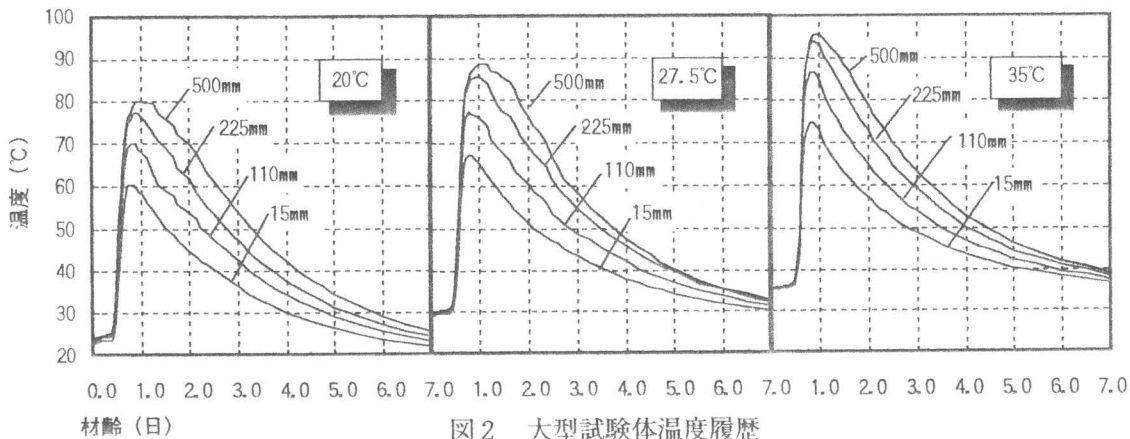


図2 大型試験体温度履歴

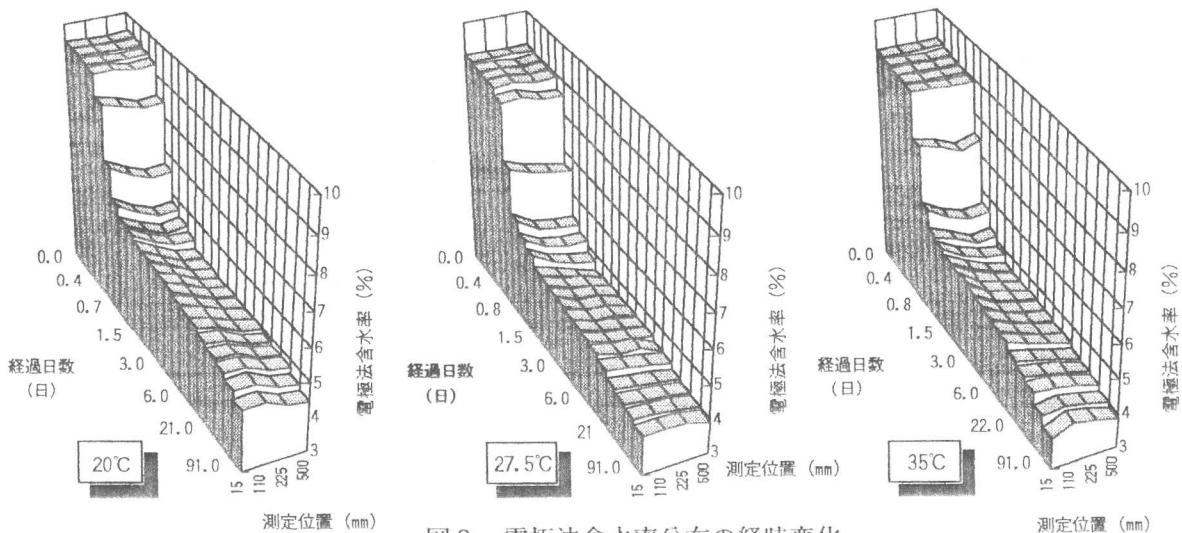


図3 電極法含水率分布の経時変化

図3に含水率分布の経時変化を練り上がり温度（養生温度）ごとに示す。最高温度に達する材齢1日で、含水率の変化は緩慢となり、含水率の変化は、主として水和反応による水の消費により生じている。含水率分布では、水和初期に中心部の含水率が表面部に比較して急激に低下し、中心部と表面部の間に含水率勾配が生じた。その後は中心部が最も低い含水状態を保ちながら推移し、材齢13週の段階では表面からの乾燥による影響が加わって、含水率は110、15、225、500（mm）位置の順で大きくなり、15mmと225mmはほぼ等しい結果となった。

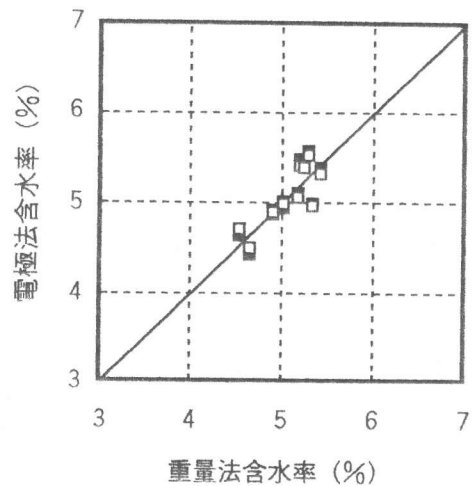


図4 電極法含水率と重量法含水率

図4に電極法含水率と重量法含水率の関係を示す。重量法含水率は、電極法含水率算出のために用いた同一試験体の105℃絶乾重量から求めたもので、両者はよく対応しており、温度範囲が20～35℃において標準偏差は0.18%であった。

3. 2 圧縮強度

図5は、練り上がり温度、養生温度ごとに温度追従試験体の材齢4週と13週強度、大型試験体各測定位置からのコア試験体の13週強度、20℃標準水中および20℃封緘養生試験体の強度を示したものである。20℃封緘養生試験体が材齢4週から13週にかけて強度が増加しているのに対し、高温履歴を受けた温度追従試験体では強度増進が停滞した。しかし、本実験の範囲では材齢13週強度において、温度追従試験体、コア試験体ともに文献 [1] [2] に示されているような強度が4週標準水中養生強度を大きく下回るものは再現されなかった。

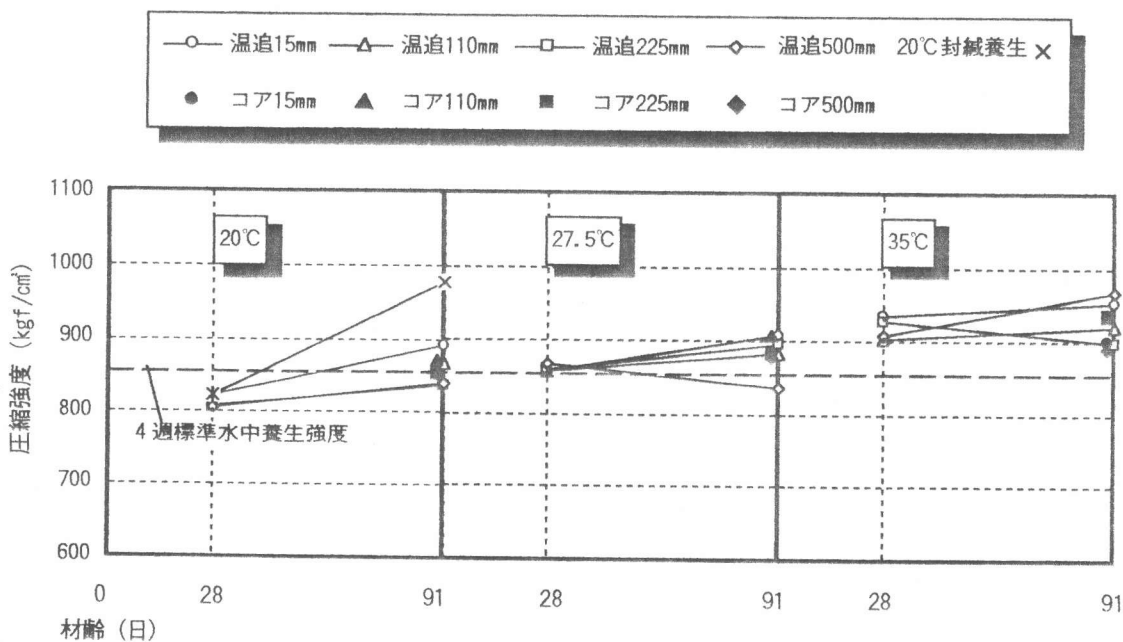


図5 温度追従試験体およびコア試験体の圧縮強度

3. 3 平衡含水率、結合水率と相対湿度の関係

水和反応の進行程度の指標として結合水率を用い、W/C28%のセメントペーストについて結合水率と相対湿度の関係を求めたものが図6である。結果は、T.C.Powers [6]、小野によるクリンカー鉱物の水和活性に関する研究 [7] の結果と一致しており、相対湿度が80%以下では水和反応の進行が著しく停滞する傾向であった。コア試験体のスライス片について、等温吸着により求めた平衡含水率と相対湿度の関係を図7に示す。練り上がり温度（養生温度）により平衡含水率の値は異なるが、相対湿度66%以上で、ほぼ直線的な関係が認められる。

図8に大型試験体各測定点の電極法含水率の経時変化と相対湿度80%に相当する含水率との対応の一例を示す。図中の実線が、前述の実験によって求めた相対湿度80%に相当する平衡含水率である。大型試験体の中心部では材齢7日、表面部で材齢42日において、相対湿度が80%を下回る結果となっている。図6に示した結果から、この材齢以降、セメントの水和反応の進行が阻害される状態であることが推測され、これが大型試験体の長期強度増進の鈍化につながったものと考えられる。

温度追従試験体においても強度増進の停滞が認められた。高温度履歴を受けることにより、細孔内の水分が水蒸気へと相変化を起こし、細孔内の圧力が上昇する。このため、試験体は厳密には封緘されない状態に

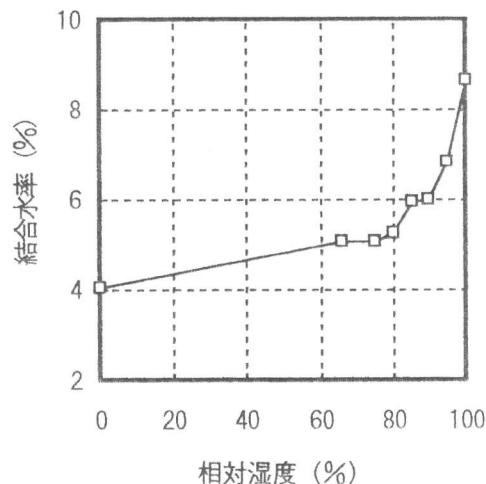


図6 結合水率と相対湿度

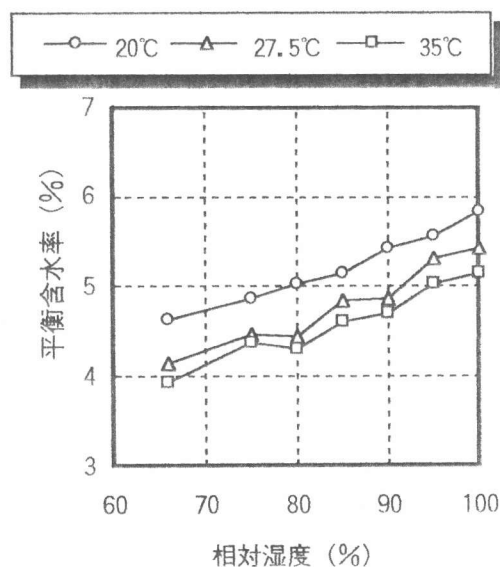


図7 平衡含水率と相対湿度

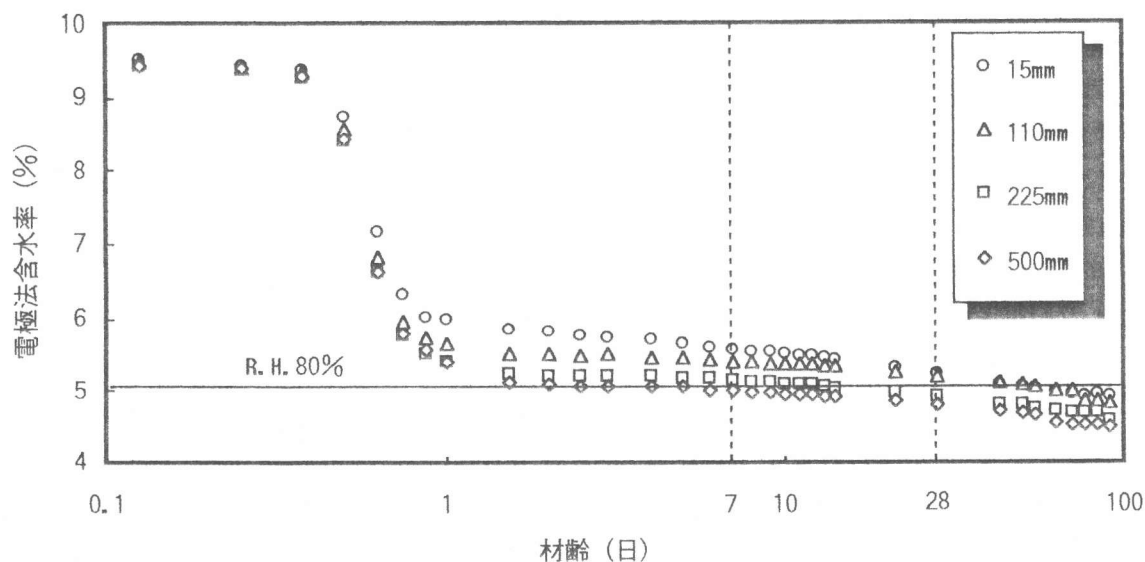


図8 電極法含水率の経時変化とRH80%に相当する含水率の対応

なり、外部へ圧力とともに水分を放出した可能性が考えられる。ここで体積一定の理想気体とした水蒸気について、飽和水蒸気圧の温度による変化を試算すると、温度20℃の飽和水蒸気圧に対して、温度が90℃の飽和水蒸気圧は約30倍となる。

このことは大型試験体についても同様である。本研究で用いた大型試験体は寸法D 500×L 600×H 200 (mm) であり、手前を除く5面を断熱・断湿し、上下、左右を熱的には無限長としているが、圧力に対しては各面で解放に近い状態である。このため、大型試験体内部における水分移動の駆動力となる圧力差が周囲に逸散した可能性がある。実大柱などのように周囲で圧力が拘束されるなら、水分は蒸気圧差を駆動力として中心部から表面部へと移動し、中心部と表面部での含水率の差は本実験で得られたものより大きなものとなる可能性があり、中心部では表層部と比較してより大きな強度増進の低下が生じる可能性がある。

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測定した結果、材齢1日程度の初期材齢時に中心部と表面部で大きな温度差が生じ、この温度差に起因して部材内部に含水率の差が生じることが明らかとなった。
- (2) 高強度マスコンクリート部材内部の含水率分布について、材齢3カ月程度の長期材齢時に表層部に乾燥の影響が加わるものの水和熱による高温度履歴を受けた材齢1日以降、常に中心部が最も乾燥した状態で推移した。
- (3) 高強度マスコンクリートの中心部の乾燥には水和反応による水分の消費に加え、温度勾配に起因する水分の表層部への移動が関与しているものと考えられる。
- (4) 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著しく停滞する。その結果、長期強度増進が停滞したものと考えられる。

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] 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
- [4] 今井敬・鎌田英治・桂修・長谷川寿夫：高強度コンクリートの強度性状把握のための柱モデル実験、JCI年次論文報告集 Vol.13、pp.237-242、1991
- [5] 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、JCI年次論文報告集 Vol.16、pp.735-740、1994
- [6] Powers, T. C. : A discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete, Proc. Highw. Res. Bd., 27, pp.178-188
- [7] 小野吉雄：クリンカー鉱物の水和活性と平衡水蒸気圧、セメント・コンクリート論文集 No.44、pp.24-29、1990