

論文 部材厚の違いが加熱したモルタルの含水率分布・力学性状に及ぼす影響

酒井 正樹^{*1}・都築 正則^{*1}・平田 隆祥^{*2}・一瀬 賢一^{*2}

要旨：本研究は、一方向から継続して加熱を受ける部材厚の異なるモルタルに対して、含水率分布の経時変化から水分移動性状を明らかとすることを目的として行ったものである。結果として、次のことがわかった。(1)400mm以上の部材厚では、加熱面近傍での乾燥による含水率勾配はほとんど等しくなる。(2)電極法と乾燥質量法による含水率測定方法では、容積含水率で0～5(%/vol.)程度の誤差が生じる。(3)既往の研究と比較すると、加熱面近傍における水分の押し出し現象が見られない。また、部材厚により含水率分布が大きく異なる。(4)本実験における加熱乾燥条件の範囲では、力学性状の低下はほとんど生じない。

キーワード：モルタル，加熱，乾燥，含水率，圧縮強度，静弾性係数

1. はじめに

長期に渡って100 未満の高温履歴を受けるマスコンクリート部材の力学性状は、温度および水分移動の影響を受けることが既往の研究^{例えは¹⁾}で報告されている。

このような部材の健全性を評価するためには、長期加熱を受けるマスコンクリートの硬化物性の時間的変化を把握する必要があるが、加熱時における部材の力学性状及び熱、水分の移動を実験的に確認した報告は少ない。

加熱を受けるコンクリート内部の含水率を測定した例として、U.Schneider²⁾、G.L.Engrand³⁾、H.P.Lien⁴⁾の研究がある。これらの研究は、加熱中もしくは加熱終了後にコンクリート部材から切り出した試料片の絶乾質量から、部材内部の含水率分布を求めたものである。また、国内では仕入らの研究⁵⁾がある。この研究は、コンクリート部材内部に複数の含水率測定用の電極を埋込み、電気抵抗値の測定から含水率分布を求めたものである。

本研究は、一方向から加熱を受けるモルタルの含水率分布の経時変化から、水分移動性状を実験的に明らかとすることを目的として行ったものである。構成材料をモルタルとしたのは、硬化コンクリート中の水分は、その

ほとんどがペースト部分に存在しているため、今後の解析的検討を視野に入れ、粗骨材を除いたモルタルで水分を精緻定量化することを目標としたためである。

含水率の測定は、乾燥質量法、電極法、相対湿度法の3種類で行い、比較検討を行った。

加えて、加熱後の試験体から複数のコアを採取し、加熱乾燥による圧縮強度・静弾性係数の変化を検討した。

2. 実験概要

2.1 実験条件

実験の組合せを表-1に示す。

表-1 実験の組合せ

項目	摘要	水準数
材料	モルタル	1
試験体寸法	W100mm×D150mm ×H100, 200, 400, 800mm	4
養生方法	封かん91日	1
加熱条件	片面加熱65°C, 90°C	2
加熱期間	91日	1
水分境界条件	加熱面および4側面:シール 開放面:アンシール	1
熱境界条件	加熱面:加熱温度(65°C, 90°C) 4側面:断熱 開放面:20°C, R.H.60%	1

表-2 測定項目と測定方法

測定項目	測定方法	測定時期					測定位置
		加熱前	加熱7日	加熱28日	加熱56日	加熱91日	
自由水含水率	乾燥質量法 (試験体割裂)	○	○	○	○	○	【割裂の位置】加熱面より ^{※2} 25, 75mm, …(50mm間隔)…775mm
	電極法	連続測定(1回/1Hr)					加熱面より50, 150, 250, 350, 450, 550, 650, 750mm
	相対湿度法 ^{※1}	連続測定(1回/1Hr)					加熱面より50, 150, 350, 550, 750mm
結合水率	600°C強熱減量	○	○	○	○	○	電極法に同じ
温度	熱電対	連続測定(1回/1Hr)					電極法に同じ
圧縮強度	φ50×100mmコア	○ ^{※3}				○	電極法に同じ
静弾性係数	φ50×100mmコア	○ ^{※3}				○	電極法に同じ

※1)加熱温度90°Cのみで測定 ※2)詳細は図-1参照 ※3)φ50×100mmのテストピースによる

*1 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 工修 (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 博(工)(正会員)

試験体の構成材料はモルタルとした。

試験体寸法は、加熱面の面積をW 100mm × D 150mmと固定し、部材厚を変化させるため、高さをH=100, 200, 400, 800mmの4水準とした。加熱前養生は20 恒温室にて材齢91日まで封かん養生とした。加熱条件は、加熱面の温度を65 と90 の2水準として、加熱期間は91日間とした。試験体の水分境界条件は、水分移動を一次元と想定し、加熱面および4側面をアルミテープでシールして水分逸散を防止し、加熱面の逆の1面のみ開放して水分が逸散するようにした。試験体の熱境界条件は、4側面をガラス繊維系断熱材で覆い、加熱面の逆の面である開放面は20 , R.H.60%の恒温恒湿室に露出させた。

測定項目を表 - 2 に示す。

含水率の測定は、自由水含水率および600 強熱減量による結合水率を加熱前(封かん91日)、加熱7日、28日、56日、91日にそれぞれ測定した。

自由水含水率の測定は、乾燥質量法、電極法、相対湿度法の3種類の方法で行った。それぞれの長所と短所を表 - 3 に示す。なお、電極法と相対湿度法はデータロガーにより連続測定を行った。

また、加熱91日後に 50mm × 100mmの複数のコアを湿式で採取し、圧縮強度・静弾性係数を測定した。

2.2 試験体の作製

モルタルの調合表を表 - 4 に示す。本調査は、一般的なFc24のコンクリートの調合(表 - 5)から粗骨材を取り去った調合とした。

表 - 3 自由水含水率測定方法の長所と短所

乾燥重量法: 割裂試験体の絶乾重量より容積含水率を算出	
長所	自由水を乾燥させて直接計測する最も確実な方法
短所	得られる含水率は割裂厚さの平均値となる 各材齢で割裂する試験体が異なり、試験体が多数必要
電極法 : 試験体内部に電極を埋込んで電極抵抗値を測定し、校正曲線により容積含水率を算出	
長所	非破壊で連続的に含水率の変化を捉えられる
短所	使用材料ごとに校正曲線を作成する必要がある
相対湿度法: 試験体の内部に温湿度センサを埋込む	
長所	相対圧という明確な物質量が得られる
短所	高湿度域における相対湿度の変化が鈍感である

表 - 4 モルタルの調合

W/C (%)	目標フロー値 (-)	S/C (-)	単位量 (kg/m ³)		
			W	C	S
60	180	2.75	285	473	1301

表 - 5 想定したコンクリートの調合

Fc	W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
					W	C	S	G
24	60	18	4.5	47.9	185	308	847	931

表 - 6 モルタルの基礎性状

目標値		実測値		封かん材齢91日	
空気量 (%)	フロー値 (-)	空気量 (%)	フロー値 (-)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
6.9	180	6.4	195 × 205	42.2	24.1

セメントは、JIS R 5210 に適合する普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³)を使用した。

骨材は、細骨材として木更津産陸砂(表乾密度2.62g/cm³, 吸水率1.85%, FM2.71)を使用した。

混和剤はリグニンスルホン酸系AE減水剤を用い、フロー値が180となるように調整して添加した。

モルタルの基礎性状を表 - 6 に示す。打設時のフレッシュ性状は、目標フロー値である180を満足した。空気量は6.4%であった。硬化性状は、封かん養生91日で圧縮強度が42.2N/mm², 静弾性係数が24.1kN/mm²となった。

図 - 1 に、試験体の一例として乾燥質量法の試験体のイメージを示す。試験体の作製には木製型枠を用い、所定の位置で割裂できるように、あらかじめ割裂位置に5mm角の目地棒を設置して打設を行った。試験体の打設は打込み高さが100mmとなるように横置きで行い、材齢48時間で脱型し、その後アルミテープを巻いて材齢91日まで20 封かん養生とした。

2.3 試験方法

加熱試験方法は、試験体を立てた状態で、面発熱ヒーターとサーモスタットを用いて、加熱面を底面として加

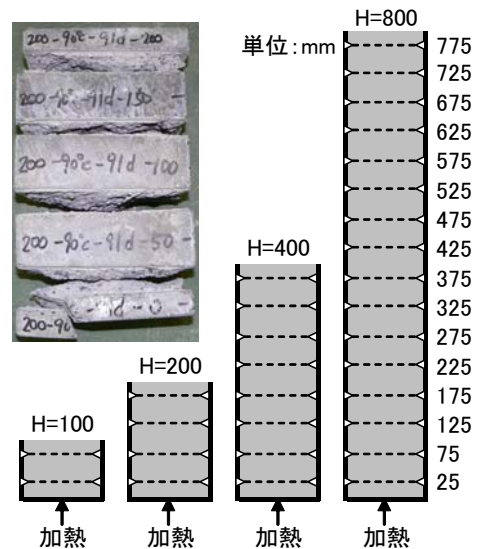


図 - 1 試験体の一例(乾燥質量法)



写真 - 1 片面加熱状況

熱を行った。片面加熱状況を写真 - 1 に示す。

乾燥重量法における試験体の割裂方法は、目地部分にくさびをあて、アムスラー式万能試験機により載荷して行った。複数に砕けた破片は、まとめて重量測定した。

圧縮強度、静弾性係数の試験方法は JIS A 1108 に準じた圧縮強度試験および JIS A 1149 に準じた静弾性係数試験を行った。

2.4 測定方法

乾燥質量法による含水率の測定方法は、試験体の割裂後直ちに質量測定を行い、その後2日間の水中浸漬後に水中質量を測定して試験体体積を算出した。試験体体積の測定後、送風式加熱炉を用いて105℃で乾燥して得た質量より、容積含水率を算出した。

電極法による含水率の測定方法は、鎌田らの既往の研究⁶⁾に準拠して行った。使用した電極は、SUS304 1.5mm の材料を用い、長さは80mm、間隔は10mmとした。また、測定はデータロガーにアダプターを接続して行った。

電極法較正曲線は、試験体を別途作製し、封かん養生91日後から調湿によって図 - 2 に示すものを作成した。電極抵抗値は、データロガーの指示値を直接用いた。

相対湿度法による含水率の測定方法は、桂らの既往の研究⁷⁾に準拠して行った。

結合水率は、600℃強熱減量より算定した。測定に用いた試料は、乾燥質量法に用いる割裂試験体の一部を使用し、骨材ごと振動ミルで微粉碎した。結合水率の算定は、試料を105℃で乾燥させた後、約1gを分取して精秤し、600℃の電気炉中で恒量になるまで強熱して得た質量により行った。測定結果は異なるサンプル2体の平均値とした。なお、試料は骨材ごと粉碎したものであるため、算定時に細骨材の骨材量を考慮した補正を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 加熱時の温度分布

熱電対により測定した、加熱時の試験体内部の温度分布を図 - 3 に示す。

加熱開始後2日間で一定の温度分布となり、加熱91日間にわたって、温度分布に変化は見られなかった。

4側面が断熱されていることから、加熱温度65℃、90℃ともに、加熱面が最も高温の概ね直線的な温度分布となったが、加熱面からの距離が50mmの位置では、直線関係からやや外れる結果となった。

3.2 加熱時の含水率分布の経時変化

図 - 4 に H=800mm の加熱材齢の経過(7日、28日、56日、91日)に伴う、乾燥質量法による含水率分布の変化を示す。加熱前の値は、封かん91日後のテストピースの結果

を代表値として示した。

加熱温度65℃、90℃ともに、加熱面からの距離が0~200mmの範囲で含水率の低下が大きく、200~700mmの範囲では、加熱前と比較して含水率の変化が小さかった。開放面に近い700~800mmの範囲では、加熱7日で既に含水率の低下が見られ、その後の材齢経過に伴う含水率の変化は小さかった。

加熱面近傍の減少した水分は、開放面の方向に押し出

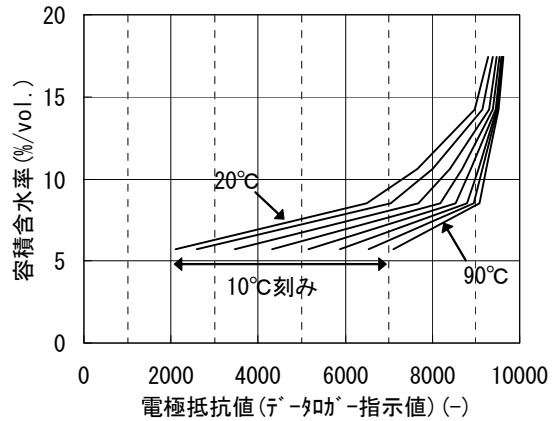
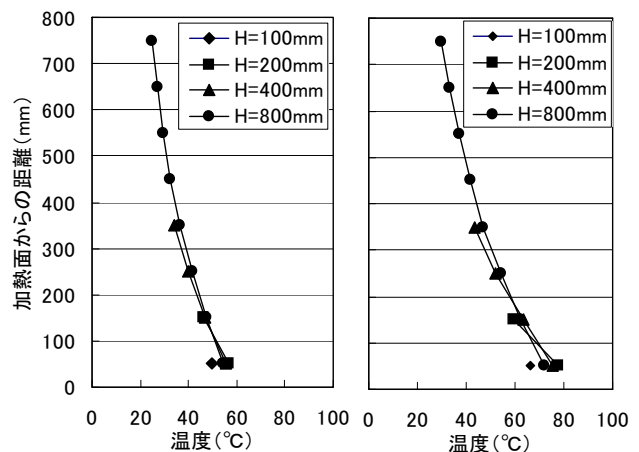


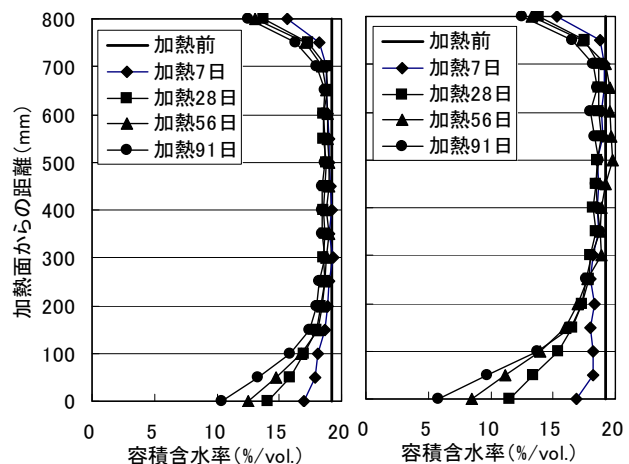
図 - 2 電極法較正曲線



(a) 加熱温度65

(b) 加熱温度90

図 - 3 加熱時の温度分布 (加熱2日 ~ 91日)



(a) 加熱温度65

(b) 加熱温度90

図 - 4 加熱時の乾燥質量法含水率の経時変化 (H=800mm)

されていることが推察される。加熱温度90℃では、加熱面からの距離が500～700mmの範囲において、既往の研究^{3)～5)}に認められるような、水分の押し出しにより加熱前の含水率を超える高含水率の部分が生じた。

3.3 部材厚の違いと加熱後の含水率分布

(1) 乾燥質量法による含水率

図-5に乾燥質量法による加熱91日後の含水率分布を示す。

加熱温度65℃、90℃ともに、部材厚が小さいほど乾燥しやすい一般的な傾向が見られた。それぞれの加熱温度ごとにH=400mmとH=800mmをみると、加熱面近傍における含水率勾配がほとんど等しくなった。加熱時の試験体内部の温度勾配は、部材厚に関わらず、加熱温度毎に一つの直線となる傾向が見られ、測定点の温度と含水率には相関関係があることが推察される。

開放面は境界条件を20℃、R.H.60%としたが、開放面から100mm以内の範囲のみで含水率の低下が見られた。

また、H=800mmでは、加熱面からの距離が300～700mmの範囲においては、加熱期間にわたって、加熱面から開放面の方向に水分が移動する経路となったことが推察されるが、加熱91日後の含水率の低下量は小さかった。

(2) 電極法による含水率

図-6に電極法による加熱91日後の含水率分布を示す。加熱前の値は、封かん91日後の全ての測定点の平均値を示した。図-7に乾燥質量法と電極法の含水率の比較を示す。

電極法では乾燥質量法と比較して、容積含水率が0～5(%/vol.)程度小さく算定され、乾燥側の判定となった。

この理由として、加熱前の時点で電極法による含水率は乾燥質量法による含水率に較べて2(%/vol.)程度小さく算定されていることから、調湿により別途作成した較正曲線の精度が悪く、加熱期間にわたって、電極抵抗値から含水率を算出する際に誤差が生じたと考えられる。

(3) 相対湿度

図-8に90℃加熱91日後の相対湿度の分布を示す。加熱前の値は、封かん91日後の全ての測定点の平均値を示した。なお、ここでの相対湿度は、加熱終了後に試験体温度を20℃一定にした時点での値とした。

相対湿度は、部材厚が小さいほど大きく低下する傾向を示し、乾燥質量法および電極法における含水率の結果とほぼ同様の傾向が見られた。

(4) 結合水率

図-9に加熱91日後の結合水率を示す。加熱前の値は、封かん91日後のテストピースによる結果を代表値として示した。なお、ここでの結合水率はセメント重量に対する比(%)で示した。

前養生条件として、封かん養生を91日行ったため、加熱開始時点での結合水率は17.9%となった。完全に水和したセメント硬化体中に含まれる結合水率が、一般的に言われているセメント重量の25%程度⁸⁾であるとすれば、測定誤差を考慮しても加熱開始時にまだ多少の未水和部分が存在していることが推察される。

加熱温度65℃、90℃ともに、加熱91日後の結合水率は加熱面からの距離に関わらず増加が見られた。加熱時に受けた温度との関係は見られなかった。このことが

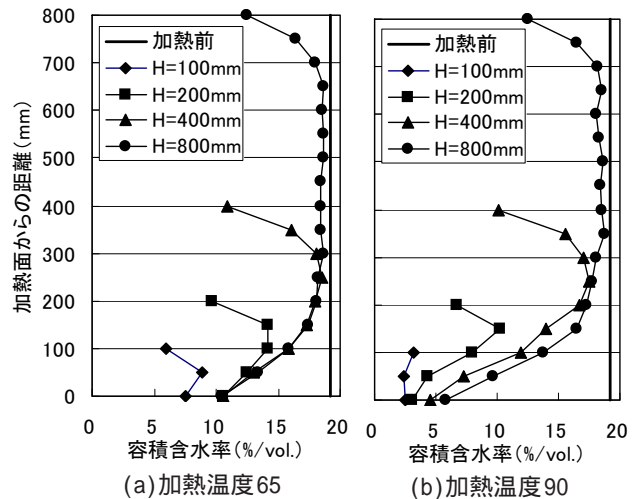


図-5 乾燥質量法による加熱91日後の含水率分布

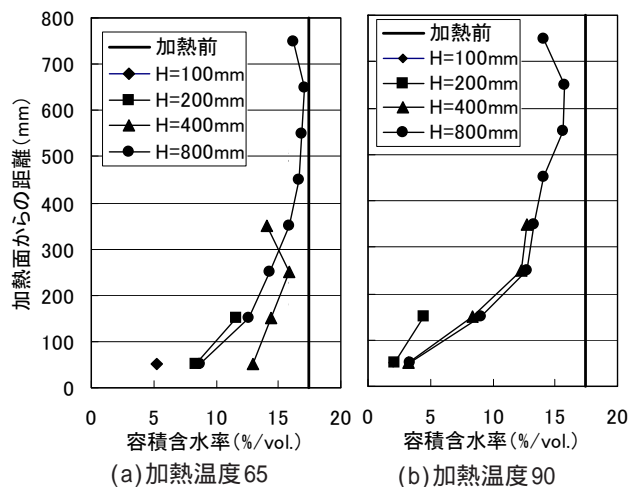


図-6 電極法による加熱91日後の含水率分布

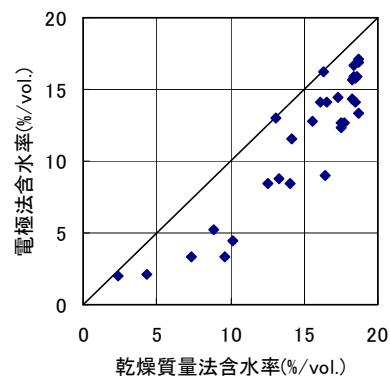


図-7 乾燥質量法と電極法の比較

ら、加熱により多少の水和は進んだものの、部材内部での水和組織は概ね均質であると考えられる。

3.4 既往の研究との比較

本実験結果における加熱91日後の乾燥質量法による含水率分布と既往の研究結果との比較を図-10に示す。

本実験はモルタルによる結果であるのに対して、既往の研究結果は、コンクリートによる結果である。既往の研究結果との比較検討を行うため、粗骨材中の水分を便宜的に無視し、モルタルのみを考慮した式(1)を用いて、本実験で得られたモルタルの含水率をコンクリートの含水率に換算して考察を行った。

$$H = M \times (1.0 - G) \quad (\%/vol.) \quad \dots(1)$$

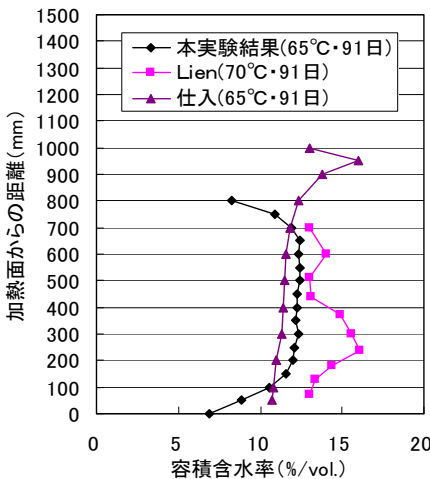
ここに、H:コンクリートに換算した容積含水率

M:モルタルの容積含水率(%/vol.)

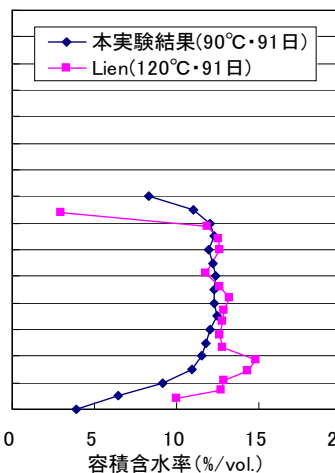
G:粗骨材の単位絶対容積(m^3) = 0.351

加熱温度65℃では、部材厚が1000mmの仕入の研究(電極法)と部材厚が800mmのLienの研究(コアによる乾燥質量法)を、加熱温度90℃では、部材厚が800mmのLienの結果(乾燥質量法)を参照した。加えて、部材厚が1500mmのEngland(乾燥質量法)と仕入(電極法)の研究結果を比較のために示した。これらの研究は、試験体の体積はそれぞれ異なるものの、加熱条件は本実験と同様に加熱面および側面がシール条件、加熱面の逆の一面のみ開放条件としたものである。ただし、加熱温度が100℃を超えるデータが一部含まれている。

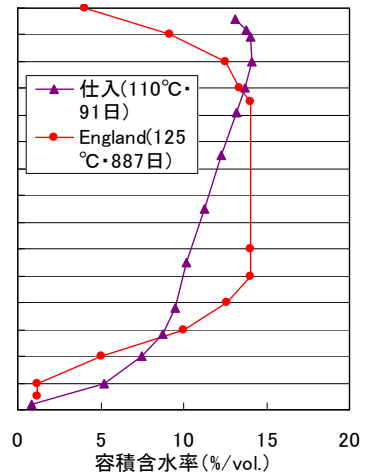
加熱温度65℃、90℃ともに、仕入、Lienの結果では加熱面近傍において水分の押し出しにより加熱前の含水率を越える高含水率となる部分が生じることが報告されている。しかしながら、本研究結果では加熱温度90℃において、わずかにその傾向が見られただけであった。



(a)加熱温度65



(b)加熱温度90



(c)参考：部材厚1500mmの場合

図-10 既往の研究との比較(本実験結果はコンクリートに換算した含水率)

この理由として、本研究の加熱温度が、既往の研究と比較して高いこと、また、本研究の構成材料はモルタルであり、既往の研究のコンクリートと比較して、組織中で水分の移動経路が連続しておらず、水分の移動速度が緩やかとなった可能性があることなどが考えられる。

加熱面近傍を除けば、加熱面からの距離が300～

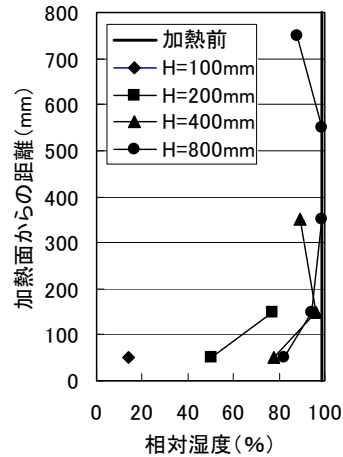
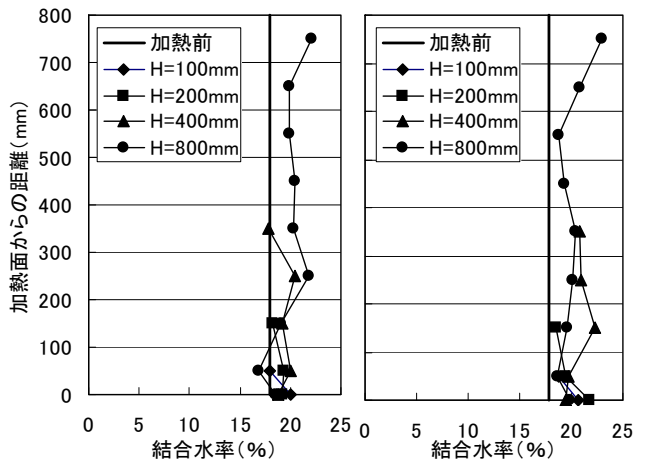


図-8 加熱91日後の相対湿度(90℃加熱)



(a)加熱温度65

(b)加熱温度90

図-9 加熱91日後の結合水率

700mmの位置において、含水率の低下が小さく、含水率勾配がほとんど見られない傾向が、本研究と既往の研究で一致しており、本試験結果の再現性を確認した。

また、本研究におけるH=800mmの含水率分布と、England,仕入の部材厚が1500mmの含水率分布を比較すると、加熱面近傍の含水率勾配が全ての試験結果で異なっており、部材厚により水分移動性状が異なることが考えられる。ただし、これらの結果は加熱温度、加熱期間がそれぞれ異なっており、部材厚の大きな場合については、今後の検討が必要と考えられる。

3.5 加熱後の圧縮強度・静弾性係数

図-11に65 加熱91日後、図-12に90 加熱91日後の圧縮強度と静弾性係数を示す。加熱前の値は、封かん91日後のテストピースの結果を代表値として示した。

加熱後の圧縮強度は、90 加熱の加熱面より150mm以下の部分、H=400mmの加熱面より350mmの部分、H=800の加熱面より750mmの部分でわずかに低下したほかは全て増加した。この理由として、含水率の高い部位では、加熱により水和が促進されたことなどが考えられる。

加熱後の静弾性係数は、加熱温度65、90ともに、加熱面からの距離が300mm以下の部分で、わずかに低下した。静弾性係数は、乾燥の影響を受けやすいことが既往の研究¹⁾でも報告されており、同様な傾向を示した。

4. まとめ

一方向から加熱を受ける、部材厚の異なるモルタルに対して、以下のことが明らかとなった。

- (1) 加熱時の温度分布は、加熱面近傍を除けば、概ね直線的な分布となる。
- (2) 400mm以上の部材厚では、加熱面近傍での乾燥による含水率勾配はほとんど等しくなる。
- (3) 電極法による含水率は、乾燥質量法と比較して、容積含水率で0~5(%/vol.)程度の誤差が生じる。
- (4) 既往の研究と比較すると、加熱面近傍での水分の押し出し現象が見られない。また、部材厚により含水率分布が大きく異なる。
- (5) 本実験における加熱乾燥条件の範囲では、力学性状の低下はほとんど生じない。
- (6) 本実験はモルタルで行ったが、コンクリートと比較して、組織中の水分移動経路の連続性が異なっている可能性があり、コンクリートへの適用には遷移帯を考慮した検討を加える必要がある。

参考文献

- 1) 嵩英雄ほか：高温下のコンクリートの物性，コンクリート工学，Vol.22, No.3, pp.13-20, 1984.3

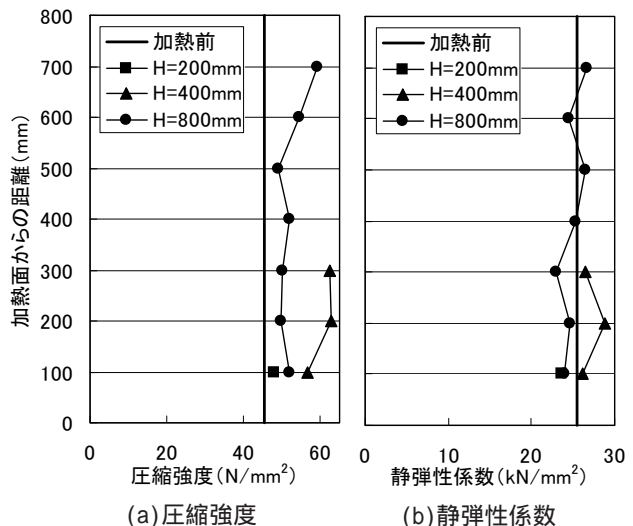


図-11 加熱91日後の圧縮強度・静弾性係数(65 加熱)

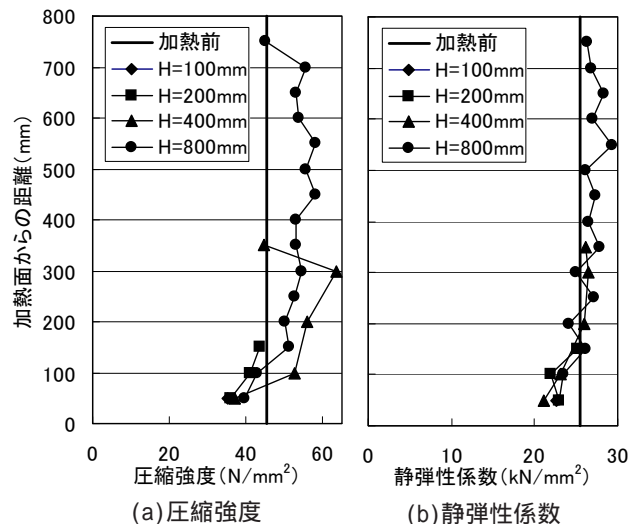


図-12 加熱91日後の圧縮強度・静弾性係数(90 加熱)

- 2) U.Schneider：コンクリートの熱的性質，技法堂出版，1983.12
- 3) G.L.England: Effects of moisture migration on shrinkage, porepressure and other properties, Trans. 4th Int. Conf. SMIFT Vol.H, 1977
- 4) H.P.Lien：Coupled heat and mass transfer in concrete element at elevated temperature, Nuclear engineering and design, 156, pp.109-119, 1995
- 5) 仕入豊和ほか：一面加熱を受けるマスコンクリート部材中の強度性状に関する実験研究，日本建築学会構造系論文集，第387号，pp.8-14, 1988.5
- 6) 鎌田英治ほか：コンクリート内部の含水率の測定，セメント技術年報，No.30, pp.288-292, 1978
- 7) 桂修ほか：高分子湿度センサーを用いたコンクリート中の相対湿度測定，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1207-1208, 2005.9
- 8) 田代忠一：セメント硬化体中の水分，コンクリート工学，Vol.32, No.9, 1994.9