

オートクレーブ養生時の熱伝導とブロック内部の強度差について

愛知工大 正員○森野奎二

K.K.キラルクス 白木 栄

〃 松本修身

(1) まえがき

オートクレーブ養生製品の製造では、製品の断面寸法に対して養生条件が適当でないと、製品に温度ひびわれが生じる⁽¹⁾。この温度ひびわれを発生させないようにするためには、オートクレーブ養生時の温度上昇および温度下降をゆっくりと行なう必要があるが、しかし、高価なオートクレーブはできるだけ短時間で能率よく回転して使用したい場合が多く、前者とは反対に温度上昇、下降はできるだけ早く、また、最高温度持続時間も所要強度を得るに必要な最少時間とすることが望まれる。

温度ひびわれが生じない程度の最小の上昇、下降時間を求めるためには、まずブロック内部の熱伝導状態を明らかにする必要があると考え、ブロック内部に熱電対を埋め込み、温度分布を測定した。その結果ひびわれにつながるような過度の熱応力が発生しそうな温度差が、いつ、どの辺で生じるのかを明確にし、養生温度分配を決める目安を得ようとした。

また一方、このブロックの熱伝導率は比較的小さいので、ブロックの断面寸法が大きいと、中心付近にまで熱が伝わるのに長時間を要する。この受熱時間の相違は強度に少なからぬ影響をおよぼすのではないかと考え、ブロック内の各位置からコア採取を行ない、各位置の強度を求めた。このことは養生時間と強度との関係を求めることに他ならないが、これについてはあうためて円柱、および角柱供試体による実験も行ない、合わせて検討した。

(2) オートクレーブ養生時の熱伝導と熱応力

オートクレーブ養生時の熱伝導機構は、一般の熱伝導の場合と同様に Fourier の熱伝導方程式 $\frac{\partial \theta}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right)$ (θ : 温度, t : 時間, $k = \frac{\lambda}{c \cdot r}$: 熱拡散率 (温度伝導率) λ : 熱伝導率, c : 比熱, r : 密度) によっていると考えられる。従って、熱拡散率、熱伝導率等を測定して、初期条件や境界条件を与えることにより、方程式を解けば、ブロック内の温度分布あるいは熱流量を求めることができる。釜の中でのブロックの熱伝導は3次元の非定常熱伝導であらうが、最も簡略化して一次元の定常状態の熱流量 ($q = \frac{\partial \theta}{\partial x}$) で示すと、 $q = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x}$ となり、また $q = -\lambda \frac{\theta_1 - \theta_2}{b}$ (b : $\theta_1 - \theta_2$ を示す距離) となる。この式は時間によって熱流が変化しない場合に適用できるものであるが、厚さの変化でどの程度温度差ができるか、即ち同じ釜の中に大小寸法のブロックを入れた場合、どの程度の温度差が生ずるかの目安を得る場合には有効と考えられる。

また一方、温度差によって生ずる熱応力 (σ) は、 $\sigma = k \cdot \alpha \cdot E \cdot (\theta_1 - \theta_2)$ (k : 拘束係数, α : 熱膨張係数, E : 弾性率, $\theta_1 - \theta_2$: 温度差) と表わされるので、 σ がブロックの強度以下となるように $\theta_1 - \theta_2$ を限定し、熱伝導率と共に既知の値として取扱うと、厚さ $2b$ が変化したときにはどの程度の熱量 q を与えればよいかかわかる。

温度上昇時には、表面側に圧縮力、内側に引張力がかかる。温度上昇時では、まだ充分な強度が発

現していないので、このときEも小ではあるが、引張力の作用する内側は小さな温度差でひびわれ易い。温度下降時には、釜の中において、釜の温度・圧力と共に下降するので、急冷されるようなことはないが、釜から出した直後に一番ひびわれ易い。ブロックの温度と露湿との温度差が大きいほど表面に大きな引張力が作用する。

たとえば、次のような計算例がある。⁽²⁾ 最初一様な温度 θ_0 をもち、 $y=\pm b$ の表面を一定温度 θ_1 に保ちながら冷却される板のある瞬間までの温度分布はFourierの理論より $\theta=\theta_1+\frac{\theta_0-\theta_1}{2} \left(e^{-\frac{\pi^2}{2b^2} t} \cos \frac{\pi y}{2b} - \frac{1}{3} e^{-\frac{9\pi^2}{2b^2} t} \cos \frac{3\pi y}{2b} + \dots \right)$ となり $y=ib$ に対して、引張応力は $\sigma_x = \sigma_z = \frac{4\alpha E (\theta_0 - \theta_1)}{\pi(1-\nu)} e^{-\frac{\pi^2}{2b^2} t} \frac{2}{\pi}$ ($P_1, P_2 = 3^2 P, \dots, P_n = n^2 P$ はある定数 ν : ポアソン比) となる。

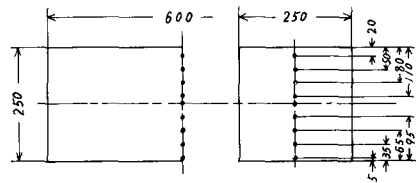
(3) オートクレーブ養生中のブロック内の温度分布の測定

実験による温度分布を求めるために、ブロック内の各位置に熱電対(c-c)を埋め込み、時間-温度-位置の関係を測定した。温度測定は、5~9点の位置で、オートクレーブ養生期間中から釜出し後常温になるまで連続的に自動記録した。測定結果の一例を1図に示すが、1図には、微粒珪砂+セメント+水混合物(クラブロックと称する)以外に、コンクリートおよびモルタルの結果をも比較のために記載した。1図によると、ブロック表面付近の温度は養生温度とともに上昇するが、内部には相当の遅れが目立つ。表面温度が180℃に達してから、内部中心が同温度になるに要する時間は25×25×60 cmブロックで約5時間、40×40×40 cmブロックで約8時間を要する。

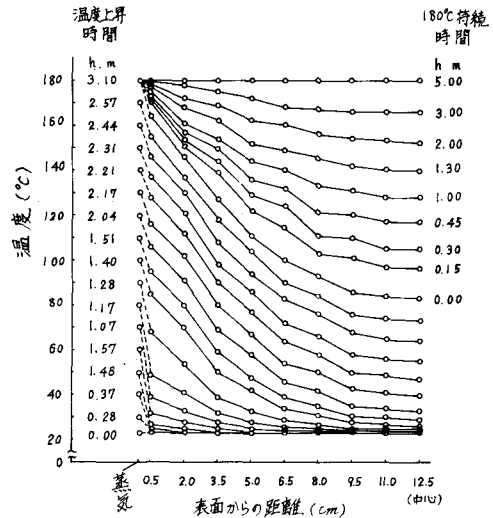
クラブロック	微粒珪砂 1.0	セメント 0.3	水 0.45
モルタル	砂 3.0	セメント 1.0	水 0.50
コンクリート	セメント 364 kg/m ³	水 200 kg/m ³	細骨材 764 kg/m ³ 粗骨材 936 kg/m ³

1表 配合

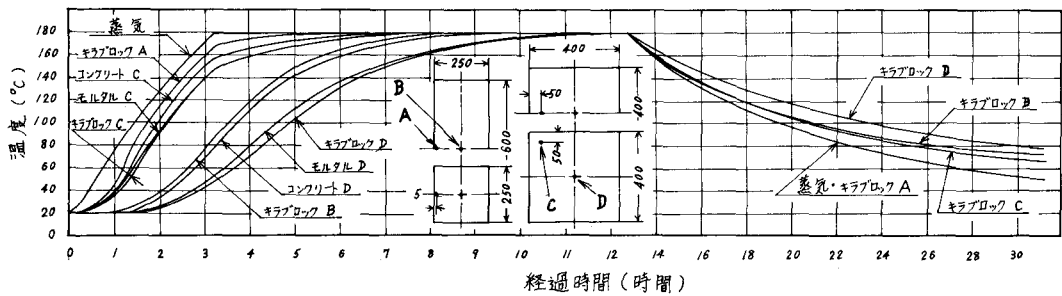
配合 1:0.3:0.45



クラブロック熱電対埋め込み位置



2図 温度分布曲線



1図 オートクレーブ養生温度とブロック内部温度

更に、詳細に同時刻における各位置の温度分布を示すと2図のようで、表面から深さが増すと共に、表面との温度差は大きくなるが、温度勾配で見ると、表面近くの方が高くなっている。このような傾向が顕著になると、温度上昇時であっても表面近くにはまだ引張り力が作用し、表面から2~3cm入った所にまえひびわれが生じている場合さえある。温度低下時の詳細は割愛したが、特に養生後は温度差が拡大する。養生時の温度が高くと急冷されるので表面にひびわれが入る。

(4) ブロック内部の強度差

ブロックの断面寸法が大きくなると、一般によく用いられているような温度上昇時間では早すぎるため、釜の蒸気温度が180℃に達した時でも、ブロック内部の温度は前述のように遅れて伝達され、180℃持続時間が相当短縮される。

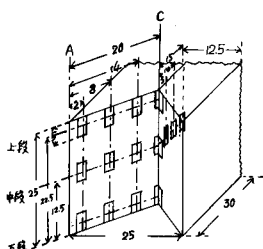
例えば、25×25×60cmブロックを180℃-5時間養生（一般的な表現方法と同様、釜の蒸気温度を示す）すると、内部中心は180℃に達した直後に降下を始めることになる。当然、表面近くと内部では強度差が生ずるものと考えられる。従って、3図のような各位置からサージングコアを採取し、強度試験を行なった。その結果を3図の右側にそれぞれ示した。

いずれの結果も熱伝導の遅れに關係するような、有意な強度差は認められない。また、他の100個以上の強度試験結果においても、バラツキが大きく、同様の結果を示した。このバラツキの大きい原因は次の点にあるものと思われる。第1点は、本実験で行なった養生条件では、ブロック内に熱応力によるひびわれが存在し、すでにコア採取不可能な場合も多いういであるから、目に見えないマイクログラックも存在しているに違いない、

強度試験結果の弱いものの中にそういったコアが存在しているのではなかと推定できる。例えば、3図の25×25×60cmブロックの結果の中心近くの弱い値は、一見熱伝導による影響かとも思われるが、他の結果とともに考えると、そうではなく、

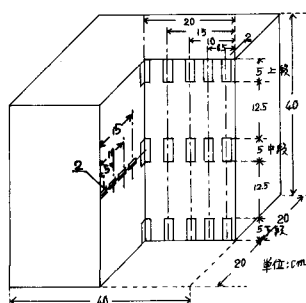
すぐ近くに白色面がみられることからクラックの影響と思われる。第2点は、キラブロックの配合は、S:C:Wが、1:0.3:0.45と水量が多いのでフリージングが著しい。フリー

ジングの影響を正確に調べた実験結果を4図に示す。明らかに、フリージングによる強度差がある。第3点は、供試体作成において、コアを採取しダイヤモンドカッターで切断し、端面が軸と垂直になるよう心掛けたが所摩滅にかけ、両端面を平滑にする。この供試体作成では、相当注意して行なわな



段Aからの距離cm	2	8	14	20
上段	90	95	96	94
中段	103	99	106	100(264kg/cm ²)
下段	102	103	119	119

点Cよりの距離cm	5	10	15	
中段	99	97	70	

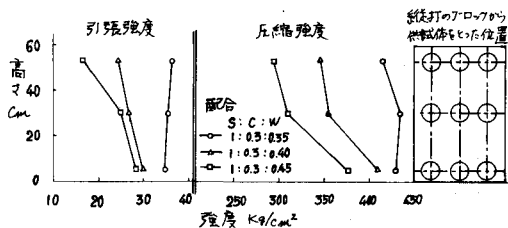


縦向き供試体					
側面からの距離 _{mm}	20	15	10	6.5	2
上段	72	98	116	64	84
中段	100(258kg/cm ²)	108	105	93	107
下段	125	108	116	112	119

横向き供試体				
中段	180	105	103	102

※ 供試体寸法は直径:高さ=1:1、補正係数0.89を付けた。

3図 ブロック内部各位置による強度差



4図 フリージングによる高さと強度との関係

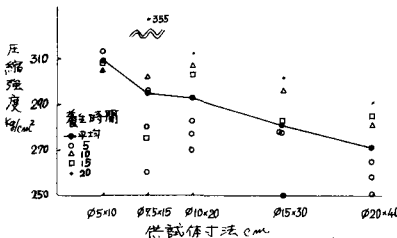
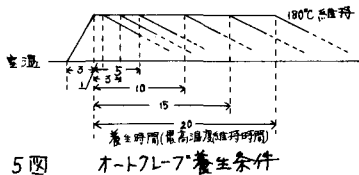
と軸と端面とが垂直とらうがい。一方の端面に球座を使用しても充分でない場合が多い。

(5) オートクレーフ養生時間と強度との関係

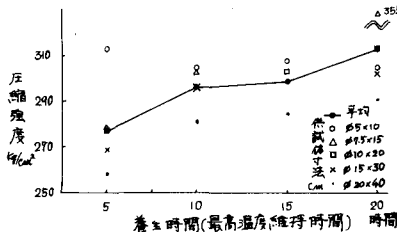
コアー採取による強度試験では、養生時間による強度差が認められない。しかし、まったくその差がないとは考えられないので、誤差が入らないように注意して作成した供試体による実験を行った。その結果を6図～8図に示す。なお5図はこの実験でのオートクレーフ養生条件である。一応、養生時間の多い方が高い強度を示す傾向は認められるが、顕著ではないので、誤差がある場合には、その差は明確に現われないと思われる。

(6) まとめ

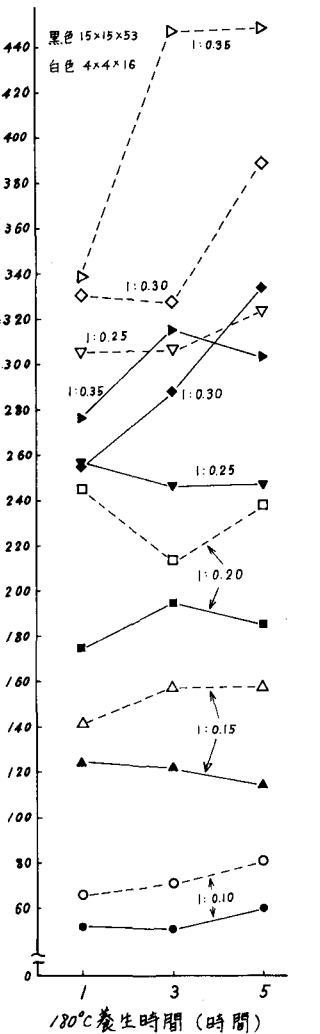
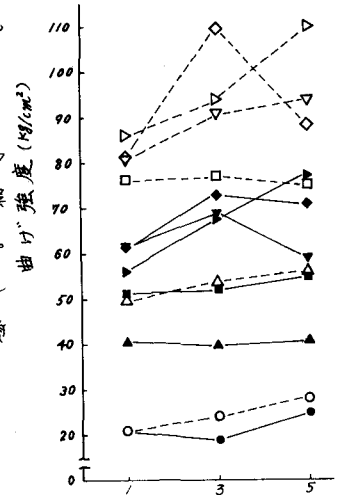
1. 強度のばらつきが入らないような、具体的な最適養生曲線を決定することは出来なかったが、その判断材料は得られたのではないと思われる。
2. オートクレーフ養生時間を短縮しても、強度減少が起らないことは、養生条件を決定する上で極めて有利である。
3. 本実験で取扱ったキヤブロックの硬化原理は、珪酸カルシウム水熱反応によっているが、 CaO 成分はセメントかうでる $Ca(OH)_2$ のみである。180℃養生時間が、1～10時間程度ではセメント水和物による強度発現が主体となつていようである。しかし硬化強度は20℃水中養生28日強度の約5倍の値を示すので、 $CaO-SiO_2-H_2O$ の結合の影響は無視できないと思われる。



6図 供試体寸法と強度との関係



7図 養生時間と強度との関係



8図 養生時間-配合-強度の関係

参考文献

- (1) 森野白木和夫 "オートクレーフ硬化ブロックの熱応力における応力集中について" 土木学会年次学術講演会昭和44年
- (2) S. P. Timoshenko, J. N. Goodier "Theory of Elasticity 2nd" PP462 金沢 潔監訳 弾性論 PP452 3版