

蒸気養生によるコンクリートの硬化促進

高橋 久雄
森 一
小松 晃

概 要

この報告は、打ち込み直後のコンクリートを100°C以下の常圧蒸気にて養生する際、主として圧縮強度におよぼす要因効果を調査しさらに、蒸気養生を行なったコンクリートの各種物理性状についても調査したものである。また調合計画、養生計画を行なう場合の資料とするため、W/C Maturity 説の検討を行ない、圧縮強度の推定式を実験的に求めた。

1. はじめに

コンクリートの硬化を促進させることは、コンクリート製品を工場で製造する場合には特に重要なことである。これは製品の製造時間の短縮、最大限の工場面積の活用、および型枠などの高価な設備の使用を向上するために重要な要素の一つとなる。

工場で鉄筋コンクリートパネルを製造する場合、現在次のようなコンクリート硬化促進方法等が使われている。

- (1)早強セメントの使用
- (2)小さい W/C とした硬練りのコンクリートを用いて十分締め固める方法
- (3)コンクリートに化学硬化促進剤の混入
- (4)各種の熱処理
- (5)コンクリートの強制脱水
- (6)コンクリートの加圧

この報告は、前記の硬化促進方法の内、蒸気にて加熱養生する方法によって硬化時間をできる限り短縮し、1日2回以上の型枠脱型を目標にした場合、コンクリートの調合および各種物理性状について述べたものである。なお、ここでの蒸気養生は、100°C以下の大気圧における飽和蒸気にて養生するもので、オートクレーブは含めていない。

一般に蒸気養生を行なったコンクリートの圧縮強度は、ごく短期の材令を除いて、標準養生コンクリートの圧縮強度に比較して低い値を示す。この原因は、ほとんど明らかにされていない。しかし種々の実験を通して考察した結果この解決方法は、原則的には次のような事項が推察されよう。

- (1)蒸気養生中のコンクリートの膨脹を防ぐ
- (2)コンクリート中の水分の蒸発を除く
- (3)コンクリートの部分伸縮を防ぐ
- (4)蒸気養生終了後、湿潤養生を行なう
- (5)蒸気養生中におけるコンクリート内部の水の移動を起させないようにする。

これに対する具体的解決策は理想的には次のごとくなるろう。

- (1)コンクリート面を加圧するかあるいは拘束する。
- (2)露出面を閉鎖する。
- (3)蒸気供給停止後のコンクリート温度を外気と大差なくなるまで適当な湿気を保持しながら徐々に下げる。
- (4)最適蒸気養生サイクルにて養生する。
- (5)蒸気養生後の養生は、水中または、湿潤養生とする。
- (6)コンクリートを超硬練りにする。

しかし、実際にはコンクリートの性状にのみ主眼をおいた最適養生方法は、技術、工程および経済的に適用できないのが実状であり、ある所で譲歩し、最終的には次のような必要条件を満足する養生計画を立てることになるろう。

- (a)ワーカビリティ
- (b)脱型時強度
- (c)出荷時または建方時の強度
- (d)28日強度（設計所要強度）
- (e)1日当りの脱型回数（工程）
- (f)経済性
- (g)その他

そこで本研究は、以上のような観点に立ち、主として実験的に検討を行なったものである。

2. 蒸気養生の方法

2.1. 現在行なわれている養生方法

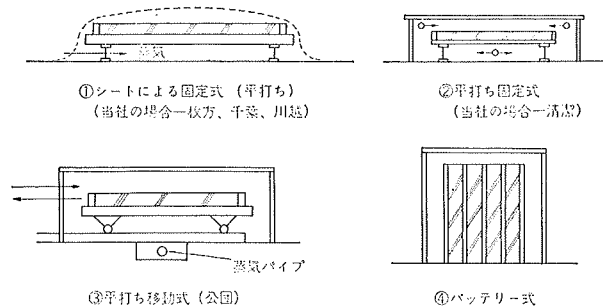
わが国では、JASS 10 の特殊養生の項、および、JIS A 5406 にも 1 部蒸気養生が取り入れられている。養生方法の分類をすると次のようになる。

- (a) コンクリートの打設場所によって
 - i 固定式……養生槽内で打設するもの
 - ii 移動式……打設したコンクリートを型枠ごと車で養生槽に運ぶもの
- (b) 打込み方向によって
 - i 平打ち
 - ii 堅打ち(バッテリー式)
- (c) 養生サイクルによって
 - i 1 日 1 回 蒸気養生時間 18 時間以内
 - ii 1 日 2 回 " 6 "
 - iii 1 日 3 回 " 3 "
 - iv 1 日 4 回 " 5 "(昼夜交代制)

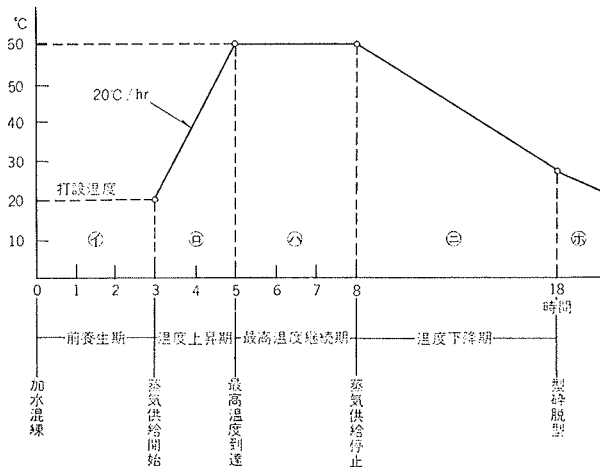
2.2. 養生サイクル

1 日 1 サイクルする場合の代表的な養生サイクルを図一 5 に示す。

- (i) 前養生時間 混練から蒸気を通すまでの時間。



図一 養生方法



図一 2 養生サイクル

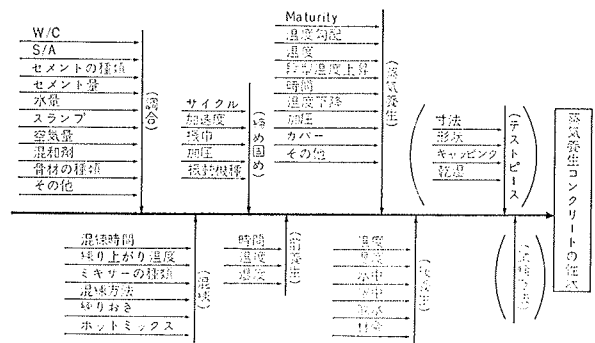
この前養生中にコンクリートの打設をし、表面仕上げを行なう。(コンクリートはこの時間中ある程度の水和反応を進行する)

- (ロ) 温度上昇時間 この期間中にコンクリートの温度を定められた割合にて所定の温度まで上昇させる。
- (ハ) 最高温度継続時間 この期間中に所定の強度にさせる場合と、次の温度下降期を含めて所定の強度を得る場合の 2 つの方法がある。
- (ニ) 温度下降期 蒸気停止後槽内に放置する期間
- (ホ) 第 2 次養生 この期間で設計所要強度を得る。

3. 蒸気養生コンクリートの圧縮強度に及ぼす要因効果

3.1. 養生コンクリートの品質特性要因

品質特性要因を図で示すと、図一 3 のようになる。



図一 3 品質特性要因

3.2. 圧縮強度に及ぼす要因効果

3.2.1. 前養生時間 軟練り、硬練りコンクリートに限らず、前養生が長い程、短期長期材令とも強度は増進する。しかし最適前養生時間は、蒸気加熱温度、練り上がり温度、W/C および温度上昇勾配等に影響を受けるが、傾向としては蒸気加熱温度が高い程、練り上がり温度が低い程、W/C が大きく単位水量が多い程、温度上昇勾配が急な程前養生時間は長くしなければならない。ミロノフは、最適前養生時間は、コンクリートが約 3~5 kg/cm² の強度になるまでの期間と考えれば良いとしている。このため前時間を短縮するには、硬化を促進するのと同じ方法、すなわち化学的硬化促進剤の使用、セメントの粉碎、環境温度を 25~30 °C にする等の方法が上げられる。また多くの研究者は、最適前養生時間は 3 時間以上、できれば 5~10 時間程度としている。

しかし実際には、作業工程のサイクルから 1 日 1 回脱型の場合で 3~5 時間、1 日 2 回脱型の場合で 1~2 時間程度に制約される。そこで筆者は、前養生時間は、コンクリートの性状および作業工程の両方を加味

して決定すべきであるとの考えから1日2サイクル行なう場合には、1時間で良いと考える。なぜならば、前時間3時間程度に比較しても、強度が著るしく低下するような事はないからである。

3.2.2. 温度上昇勾配

温度上昇勾配はゆるやかな程コンクリートの性状は良好な結果を示す。脱型時では同一 Maturity の場合、温度上昇勾配が急な程養生時間が短いにもかかわらず強度は高いけれども、長期材令では、図一8に示すように温度勾配が急なものは、脱型後の強度の増進は著るしく低い。

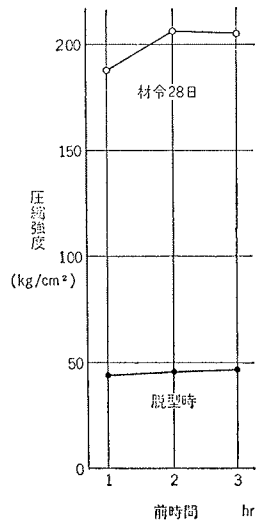
温度上昇勾配には前時間、最高温度、単位水量、混和剤の種類、部材(製品)の容積等の要因が関係する。温度上昇勾配をゆるやかにしなければならない条件は、前時間の短い時、最高温度の高い時、大きいスランプの場合、部材の容積が大きい場合等である。図一5、図一10に最高温度、混和剤の種類との関係図を示す。

またマリノフスクリは、種々の厚さの部材に対して温度上昇速度係数を与えている。

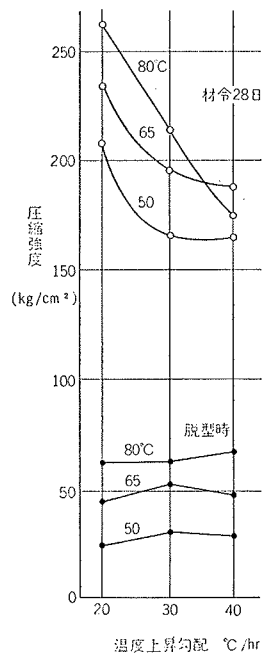
d (cm)	k (係数)
12	1.0
16	1.4
20	1.7
28	2.0

すなわち12cm厚の部材に比して28cm厚の部材は2倍の時間をかけねばならない事を示している。これはコンクリートのマイクロ組織にキレツ破壊を起させるような応力を生ずる温度差を予防する目的で定められている。ただしこの係数には前記のような各種因子の影響は含まれていない。

一般に、温度上昇勾配は20°C/hr以下とすれば大体良好な結果が得られるよう



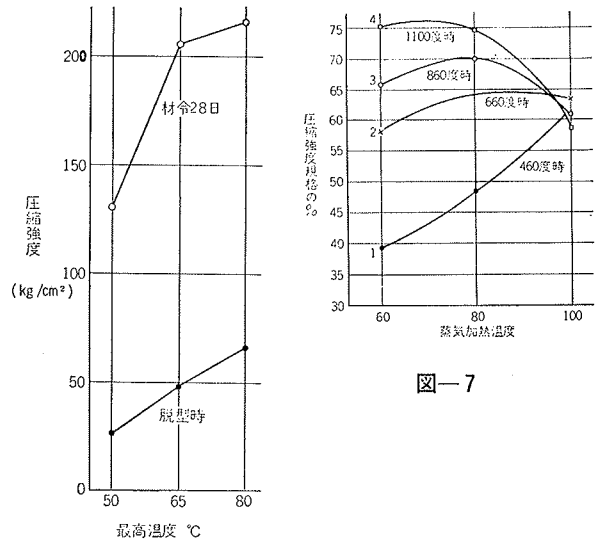
図一4 前養生時間



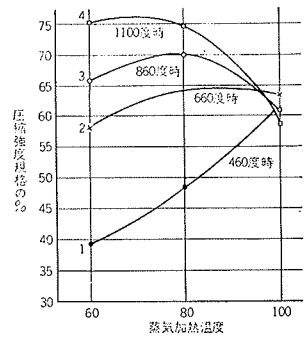
図一5 最高温度×温度上昇勾配

である。実験を行なった結果からも20°C/hr以下の場合が最適な勾配であることが確かめられたが、1日2サイクルする場合には、コンクリートを硬練りとし、25°C/hr~30°C/hrまで高めてもさしつかえないと考えられる。また10~15°C/hrの勾配の場合は、前時間はなくても支障ないようである。

3.2.3. 最高温度および等温加熱時間 コンクリートの初期硬化速度は、W/Cとスランプによっても大きく変化するが、特に大きな要因は養生温度である。



図一6 最高温度



図一7

強度の増加を評価する基準としてJASS 5は、寒中コンクリートの項で積算温度(度・日)方式を採用しているが、これはコンクリートの硬化速進過程を高温度の範囲まで、確実に表わしてはいない。これには種々の理由があるが、例えば図一6、図一7に示すように、同一 Maturity でも養生温度およびその他の養生条件により強度の発現性状が異なるためである。一般に脱型時では、養生温度が高い程強度の増進率は速いが、それも80°C前後までである。しかし95~100°Cになると強度は落ちる場合もある。また長期材令においては、80°C前後が強度増進の限度でそれ以上の温度では強度の低下が著るしい。

等温加熱時間は多くの研究によれば、最高温度により異なるが8~12時間が限度で、それ以上継続しても強度の増進はほとんど期待できない。ミロノフらの実験では長期間蒸気加熱するとコンクリートの強度は、周期的に増減すると述べている。また我々の実験では、この最適継続時間はW/Cもしくは単位水量によっても影響を受ける事が判明している。

3.2.4. 蒸気供給停止後のコンクリートの冷却

多くの研究者は、蒸気の供給を停止した後、コンクリートはそのまま養生室に置き、除々に常温まで冷却

るべきであると述べている。冷却期間中部材は養生室の媒質より温度が高いから、コンクリートから水が蒸発し、表面は乾燥して白色となる。また部材の各部の温度差により応力を生ずる。このような場合部材が大きくまた急激な冷却によって温度応力は大きくなりひいてはひびわれが発生しやすくなる。

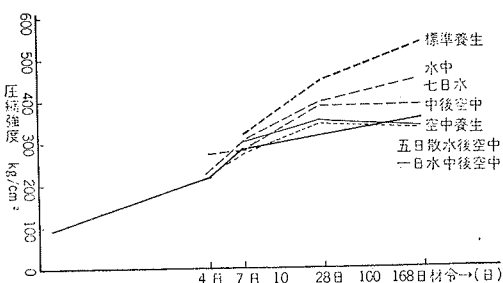
しかし実際は、最高温度80°Cの場合、部材は80~70°C程度で脱型され、部材の温度と周囲の温度との差が60~70°Cあっても多くの場合キレツは生じない。また圧縮強度については、松井²⁾の実験でも明らかなように急冷、除冷の差は認められていない。

ただし、冷却する場合コンクリートと周囲との温度差製品の形：冷却条件(たとえば風通し等)等から決まる冷却速度に関する研究は見当らない事実を注意すべきである。

3.2.5. 脱型後の養生 この問題については、比較的文献も少ないが、脱型後の養生方法によりコンクリートの強度増進は著しく異なる。

我々の行った実験では材令28日においては蒸気養生を行ったコンクリートは標準養生コンクリートに比較して、水中養生を行なったもので15%、7日間水中後空中養生で27%、1日水中後空中および5日間散水後空中、さらに初めから空中養生を行なったコンクリートは、33~37%程度強度が低かった。なお蒸気養生を行なったコンクリートは、長期材令になるに従い標準養生との強度差は大きくなり、材令28日以後においては、水中養生以外のコンクリートは強度の増進がほとんど認められず、材令168日においても28日強度とほぼ同程度であった。

以上のことから蒸気養生後空中放置する場合の強度は、一般のコンクリート強度よりもかなり低いものと考えなければならない。(JASS 5の調合計画は適用できない。)また河野³⁾の実験によれば、低温(5°C)にて蒸気養生後の養生を行なった場合、材令28日までの強度増進はかなり低い。しかし、長期材令の6ヶ月、1年になると低温養生の強度が高温養生20°Cにおいつく可能性がうかがわれると報告されている。

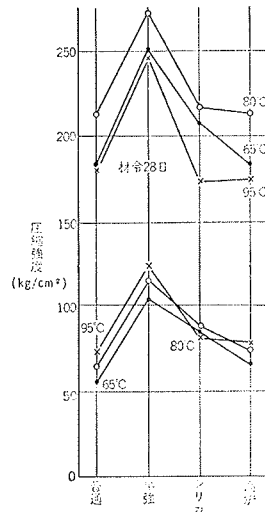


図—8 圧縮強度と材令

4. 各種セメントを使用した コンクリートの蒸気養生効果

セメントの種別については、各材令とも主効果に高度な有意性が認められるが養生条件との交互作用はほとんど認められない。これはセメントの種類が変わっても最適蒸気養生条件は変わらない事を示している。しかしセメントが異なれば、硬化速度および最終強度の絶対値は異なる。そこで各種セメントを蒸気養生する時の効果は、標準養生との比で表わす相対強度(比強度)のみで評価する事は無意味であり、強度の絶対値と、この強度が得られる温度および時間についても評価の対称としなければならない。

図—9に示すように短時間で強度を発現させることを目的とすれば早強ポルトランドセメントが最適である。蒸気養生時間3~3.5時間程度で80kg/cm²以上の強度発現は容易にできる。またシリカセメントも普通ポルトランドセメントに比して28日強度では多少劣るが脱型時強度では10~20%程強度が高い。なお高炉セメントは、松井²⁾の実験結果および図—9に示す



図—9 セメントの種別 我々の実験結果からも普通ポルトランドセメントと同程度である。さらにフライアッシュおよび中庸熱セメントを使用したコンクリートは良好な結果は得られなかった。

5. 各種混和剤と 蒸気養生コンクリート強度との関係

一般に混和剤については、各種養生条件との間に大きな交互作用は認められないが、ある特殊な条件下では強度の発現が著しく遅れるか、あるいはほとんど強度が出ない場合があるので注意が必要である。

図—10、図—11に最高温度と温度上昇勾配との間の関係を示すが、最高温度についてはほとんど交互作用は認められない。しかし温度上昇勾配については、脱型時には、無混入のものは20°C/hrより30°C/hrの方がかなり高い強度を示しているにもかかわらず、混和剤混入は、両者の間に差が認められない、また材令28日では、混和剤混入の方が無混入の場合より、温度上昇勾配を高くした場合の強度増進が小さい。

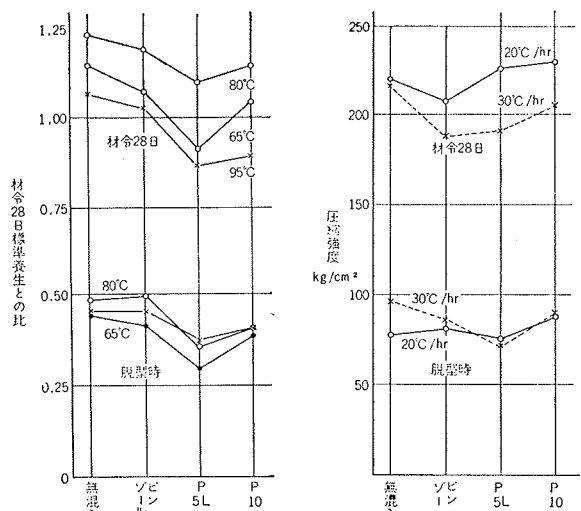


図-10 混和剤×最高温度 図-11 混和剤×温度勾配

度はある程度までしか回復しない。ただしこのような混和剤でも最適混入量を用いれば、無混入のものより強度が高くなることは注目される。

そこで混和剤を使用する場合には、我々の行った実験の範囲内では、蒸気養生コンクリート用には安定性のある混和剤が見当らなかったため、製品製作の場合の養生と同一の条件にて試験を行ない、混和剤の種類および混入量を決定すべきである。

ただし、河野⁴⁾の実験からも明らかのように、1日1脱型の場合で、前養生時間を十分取り(3時間以上)温度上昇勾配を20°C/hr以下(15°C/hr)最高温度65°Cの場合には、混和剤を混入した方が無混入の場合より良好な結果が得られることが多い。図-13の写真は混和剤の混入量を右から左に徐々に増加させた場合のコンクリートの膨張の一例である。

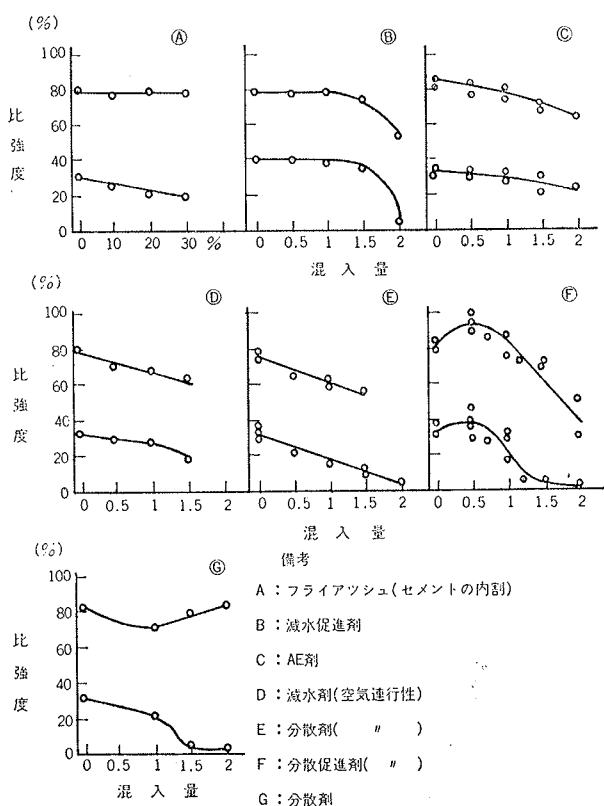


図-12 混和剤の混入量と圧縮強度

次に各種混和剤を用いて、温度上昇勾配25°C/hr、最高温度80°C、蒸気養生時間4.5時間、前時間1時間の場合の混入量と強度との関係を図-12に示す。図-12の混入量とはメーカーの推奨値を1としたものである。この結果混和剤の混入量は、ある値をわずかも越えると凝結が極端に遅れ、強度の低下をまねく混和剤もあることが判明した。さらにこのようなコンクリートは熱による膨張が大きく、材令28日においても強

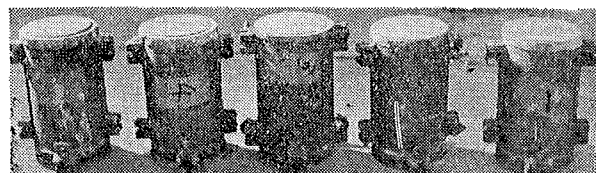


図-13 コンクリートの膨張

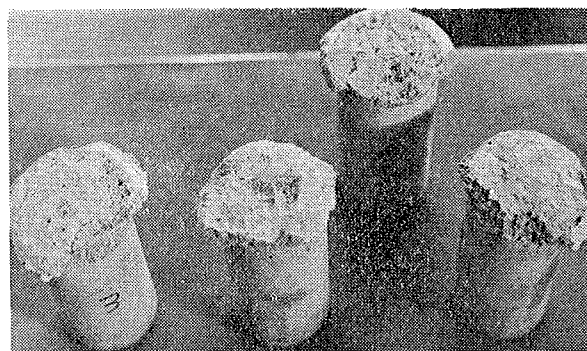


図-14 コンクリートの著しい膨張

6. 蒸気養生を行なったコンクリートの各種物理性状

6.1. 圧縮強度

蒸気養生を行なったコンクリートの圧縮強度は、普通養生(標準養生)コンクリートと比較して7日頃までは強度は高いが、それ以後は長期材令になるに従い強度の増進度は低下する。特に脱型後屋外空中養生したコンクリートは、材令28日では標準養生コンクリートの70~75%程度である。

またφ15×30cm シリンダーと実際の製品であるパネルから抜き取ったコアとの関係については図-15に示すように、版の強度はシリンダー上部(上半分)

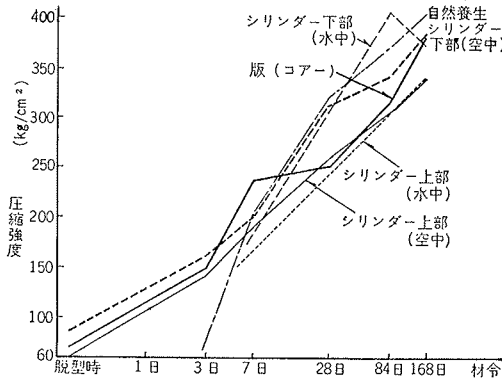


図-15 材令とコンクリート強度

のコンクリートとほぼ等しい強度の増進を示しているが、シリダー下部のコンクリート強度は版よりかなり高い値を示し、その差は長期材令になる程顕著に現われる。さらに標準養生コンクリートに比較すると強度の増進はシリダー上部ではかなり低く、下部では同程度である。このことから蒸気養生を行なうコンク

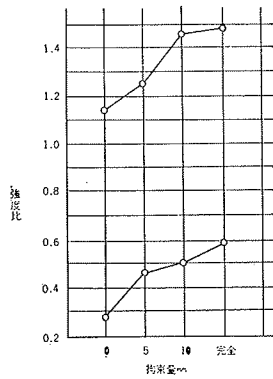


図-16

リートに対し、外部から圧力を加えれば強度はさらに増進するであろうと推察される。拘束量と強度との関係に対する実験を行なったが、コンクリートを加圧あるいは拘束して蒸気養生を行なう場合については、篠沢、⁵⁾ 向井⁶⁾ が詳細に研究されているのでそちらを参照されたい。

6.2. 引張り強度

多くの研究者は、養生条件と引張り強度との関係はほとんど認められないとしているので養生条件には、引張り強度を考慮しなくても良いと思われる。φ 15×30cm シリダーによる割裂試験の結果では、標準養生に比較して空中養生のコンクリートの場合で3~6%小さい値を示めしたにすぎない。

なお圧縮強度と引張り強度との関係は、図-17に示す。

6.3. 弾性係数

蒸気養生を行なったコンクリートのヤング係数は標準養生コンクリートに比較して多少低目である。これは圧縮強度も低くなるためであり、圧縮強度との関係では、標準養生の場合とほぼ同じである。表-1に^{1/4}セカントモジュラスを取った場合の一例を示す。

6.4. 比重

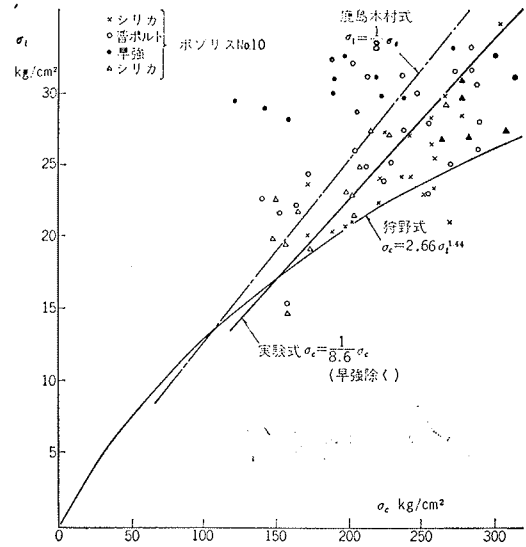


図-17 引張り強度と圧縮強度

養生条件	材 令			
	7日	28日	84日	168日
標準養生	—	3.01	3.14	3.42
蒸気養生後 空中養生	2.85	2.48	2.65	2.59
" 5日間散水後空中	2.73	—	3.16	2.62
" 1日間水中後空中	2.33	2.61	3.15	2.82
" 7日間水中後空中	2.01	2.83	2.75	3.03
" 水中養生	—	—	2.90	3.37

単位 10⁵kg/cm²

表-1 養生別のヤング係数

比重は多少小さいものであるが問題ない。表-2に現場調査の一例を示す。(各比重とも13ヶの平均)

材 令	標準養生 (表乾)		蒸気養生				
	7日	28日	水 中 (表乾)		空 中 (気乾)		
			7	28	0	7	28
骨材 25mm	2.381	2.384	2.370	2.370	2.349	2.336	2.338
骨材 40mm	2.399	2.402	2.390	2.391	2.365	2.342	2.350
計算上	骨材 25mm 2.37						
	" 40mm 2.40						

表-2 比重

6.5. 透水性

ハンソン⁸⁾ ⁹⁾ の報告によればコンクリートの透水性は蒸気養生を行なうことによって増大するが、蒸気養生終了後湿潤養生を行なえば、28日湿潤養生を行なったコンクリートとほぼ同一になると述べている。

6.6. 曲げ強度

蒸気養生と曲げ強度との関係についての報告は、ほとんど発表されていない。ヒギンソン⁸⁾ ¹⁰⁾ は、材令6ヶ月で曲げ試験を行なった結果を報告しているが、そ

れによれば標準養生の場合とほぼ同じであったと述べている。

6.7. 乾燥収縮

蒸気養生を行なったコンクリートの乾燥収縮は、標準養生コンクリートより小さくなる。後養生別の測定結果を図-18に示す。

またヒギンソン⁸⁾¹⁰⁾も蒸気養生の温度が高い程、時間が長い程、乾燥収縮は小さくなると述べている。さらにシデラーは砂、砂利コンクリートで34%、軽量骨材コンクリートで4%の収縮減少であったと述べている。

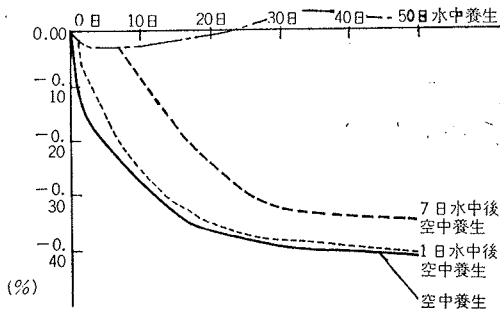


図-18 蒸気養生を行なったコンクリートの収縮率

6.8. クリープ

シデラー⁸⁾およびハンソン⁸⁾は65°C、13時間の蒸気養生で30~50%クリープは減少すると述べている。減少の原因の一部は、水和が早められたこと冷却時の乾燥等による。このことは収縮量減少の原因でもあろう。

6.9. 鉄筋とコンクリートとの付着強度

ASTM 法による試験の結果、蒸気養生を行なったコンクリートは、上端筋と下端筋にかなり大きな付着応力度差がある。また標準養生との比較においても、蒸気養生コンクリートの圧縮強度の増進が標準養生コンクリートより小さいにもかかわらず付着強度では、蒸気養生を行なった場合の方が高い値を示めた。

表-3 参照。

材令	試験体 No.	標準養生		蒸気養生	
		上端筋	下端筋	上端筋	下端筋
0日	平均	—	—	0.83	1.04
7日	平均	9.72	9.19	6.65	10.46
28日	平均	11.19	11.55	16.91	15.71

表-3 付着応力度試験結果

6.10. 凍結融解

ヒギンソン⁸⁾は、蒸気養生を行なったコンクリートは標準養生コンクリートより低い耐力であると報告しており、それは養生温度または前時間による影響はほとんどないが、養生時間は長い程、耐久性を増すと報告している。しかし大石¹¹⁾は養生温度が低い程、前時

間が多い程、抵抗性は増すと報告しており、チャンパーリン⁸⁾は養生温度の高い期間が短い程、耐久性は増すと述べている。

AE 剤の使用については、各研究者とも AE 剤を使用することにより耐久性は著しく増大すると報告している。

6.11. 硫酸塩に対する耐久性

硫酸塩に対する耐久性は、蒸気養生によってかなり増大する。しかしヒギンソン⁸⁾は、これは蒸気養生によるというより、むしろ高温の供試体が十分に乾燥することに起因すると述べている。

6.12. 中性化

炭酸ガスの吸収は、コンクリートに不可逆収縮を起すし、コンクリートを中性化させる。

これについては、現在報告された例は見当たらない。

7. 蒸気養生コンクリートの変動

現場練りの蒸気養生コンクリート圧縮強度のバラツキ調査の1例を述べる。ここでは結果の概要を示すにとどめるので詳細は、当社々報 No. 1 を参照されたい。各標本の圧縮強度ヒストグラムを図-19に示す。この結果蒸気養生後水中養生を行なったコンクリートの圧縮強度の変動は、標準養生コンクリートの圧

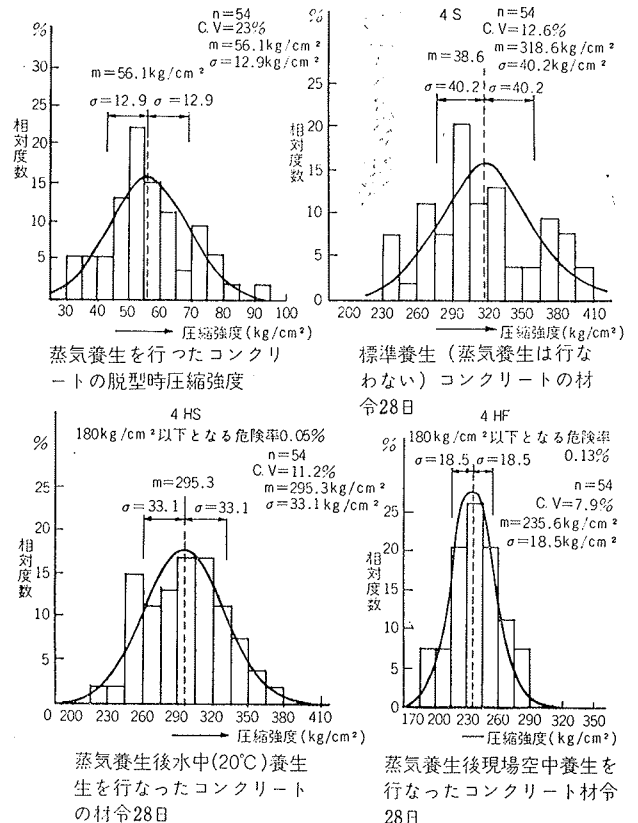


図-19 圧縮強度ヒストグラム

縮強度の変動より幾分小さい。また蒸気養生後現場空中養生を行なったコンクリートの圧縮強度の標準偏差および変動係数が非常に小さくなっているのが注目される。また養生別の強度の絶対値では、標準養生コンクリートに比較して蒸気養生後水中養生を行なったコンクリートは、材令28日で平均7%、現場空中養生を行なったコンクリートは平均26%低い値であった。

8. 蒸気コンクリートの圧縮強度推定

8.1. 強度推定に関する既往の研究

(1)河野¹²⁾

	普通ポルト	早強ポルト
60°C	$\sigma_{28}=146C/W+104$	$\sigma_{28}=245C/W-63$
	$\sigma_7=116C/W+69$	$\sigma_7=184C/W-34$
	$\sigma_1=98C/W-80$	$\sigma_1=145C/W-145$
80°C	$\sigma_{28}=129C/W+152$	$\sigma_{28}=232C/W-39$
	$\sigma_7=125C/W+34$	$\sigma_7=176C/W-21$
	$\sigma_1=95C/W-112$	$\sigma_1=184C/W-265$

ただしいずれも水中養生

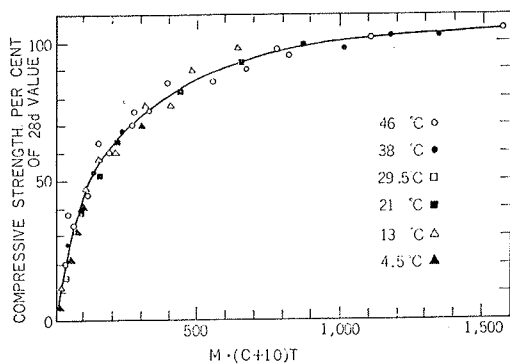
(2) E.G. Swenson¹³⁾

$$M = \sum (C+10) \Delta t \text{ or } M = \sum k(C+15) \Delta t$$

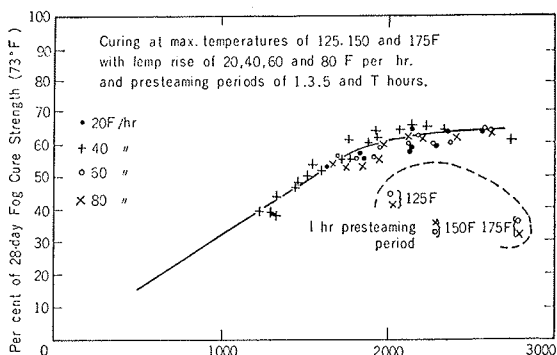
(3) T.A. Hanson¹⁴⁾

(4) E.G.W. Bush⁸⁾ Hanson⁸⁾

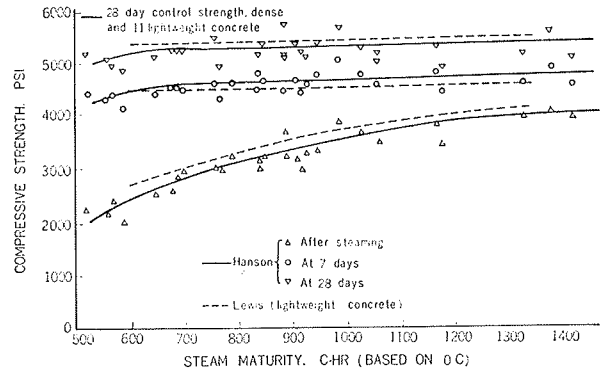
(5) Kliegert¹⁵⁾



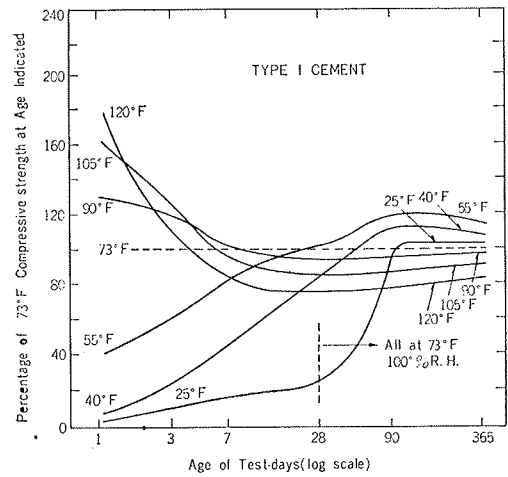
図—20 Correlation of maturity Values with strengths determined at various temperatures



図—21 Compressive strength versus maturity at 18 hr



図—22 Relation of compressive strength of 6 in. diameter cylinder to steam maturity



図—23 Effect of temperature on compressive strength

(6) 川越¹⁶⁾

$$F_t = F_0(1 - e^{-AT}) \quad F_0: \text{終局強度}$$

$$A: \text{水和反応の速度定数}$$

$$A = Be^{-R/T} = Be^{-K \cdot \frac{1}{T}}$$

t: 材令

(7) 松井¹⁷⁾

$$F_C = a[T^0 T]^n = a[T^0(\bar{t} - \alpha)]^n$$

$$= a[T^0(\bar{t} + \frac{\bar{t} + 20}{m})]^n \quad m, a, n: \text{定数}$$

F_C: 強度, T: 加水からの経過時間
T⁰: 仮想養生温度, \bar{t} : 養生中の平均温度

(8) 清原¹⁸⁾ (軽量コンクリート)

$$S = S_0 + C \cdot T^{0.4} Q^{2.0} \quad S: \text{強度} \quad Q: \text{養生温度}$$

T: 養生時間 S₀: 蒸気養生開始前の強度
C: 定数

(9) 秋浜¹⁹⁾

すべての要因を含めた直交多項式(2次まで)

$$y = a + bx + cx^2 + dy + ey^2 + fz + gz^2 + \dots$$

(10) 篠沢⁵⁾ (閉鎖養生の場合)

$$F = f(M') \quad M' = \sum d \cdot \theta \cdot t: \text{補正積算温度}$$

$a=0.0375\bar{\theta}+0.25$: 補正係数

$\theta=Mt/t$: 平均養生温度

ただし $PL=e^{(0.0888 \cdot \theta - 9, 18)}$ (加圧力の低限界) を満足する場合に限る。

(II) その他、普通コンクリートの強度算定理論

・Féret の算定式

$$F=K\left(\frac{1}{1+\frac{e+V}{C}}\right)$$

K: 定数 C:e.V.セメント, 水, 空気空隙の絶対容積

・Daff. A. Abrams の説

$$F=\frac{A}{Bx^2} \quad A, B: \text{定数} \quad x: \text{水セメント比}$$

・Lnge Lyse の式

$$F=a+bX \quad a, b: \text{定数} \quad X: \text{セメント水比}$$

8.2. W/C と積算温度方式による強度推定

この強度推定方式は、種々の式を仮定して実験値を代入し、累積寄与率、重相関係数、標準偏差等を検討することにより、適用範囲および式の形、定数を決定したものである。

その結果ある範囲に限定すれば、次式が良く実験値と合うことが見出された。

$$F_0=(A \log M+B)x+C \log M+D \pm e \text{ kg/cm}^2$$

$$F_7=aC/W+b$$

$$F_{28}=aC/W+b$$

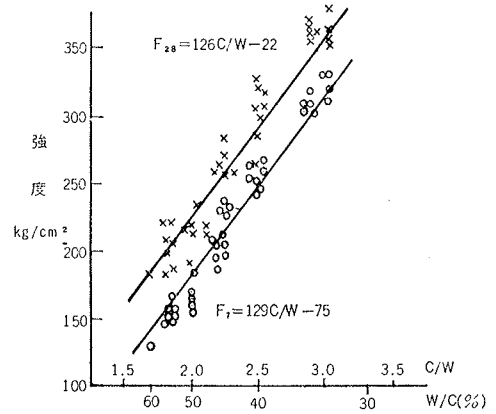


図-25 W/C—7日・28日強度

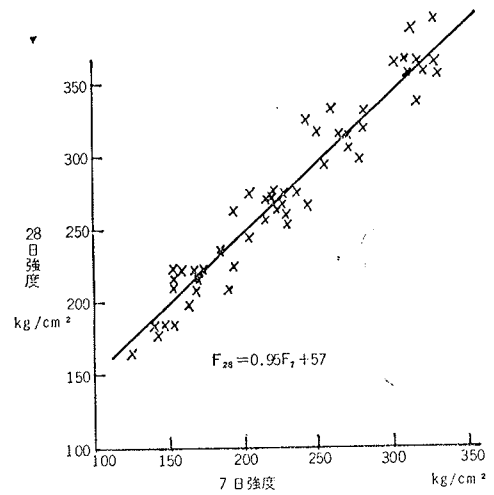


図-26 7日—28日強度

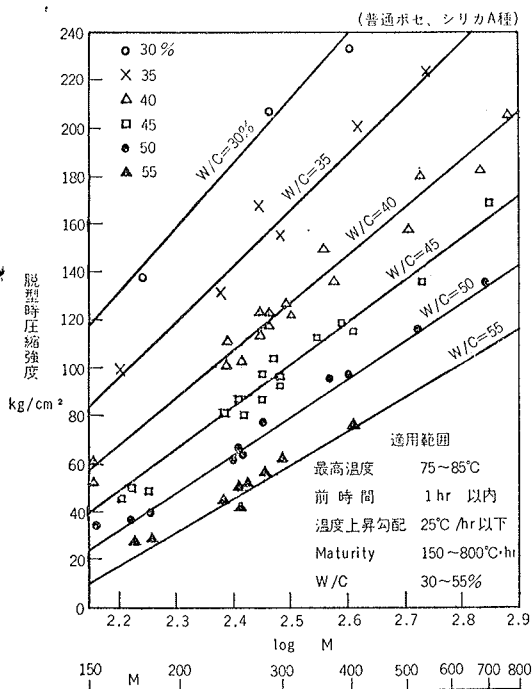


図-24 脱型時圧縮強度

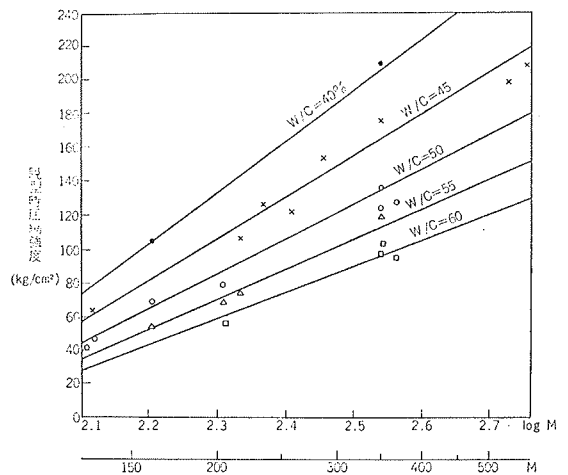


図-27 早強ポルトランドセメント脱型時圧縮強度

$$F_{28}=AF_7+B$$

ここで F_0 =脱型時圧縮強度 (kg/cm²)

F_7 =材令7日 (")

F_{28} =材令28日 (")

$$M = \sum TT^0 \text{ (Maturity) (hr} \cdot \text{°C)}$$

T = 蒸気養生時間

T⁰ = 蒸気養生温度

X = セメント水比(C/W)

そこで普通ポルトランドセメントおよびシリカセメントA種使用の場合の強度推定式を求めると次の式が得られた。(ただし蒸気後は空中養生)

$$F_0 = (85.56 \log M - 112.95)X - 11.93 \log M - 95 \pm 13 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$F_7 = 129C/W - 75 \pm 31 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$F_{28} = 126C/W - 22 \pm 31 \text{ (")}$$

$$F_{28} = 0.95 F_7 + 57 \pm 15 \text{ (")}$$

これらの式をグラフ化したものを図-24~図-26に示す。適用範囲は図-24の中に記した。

また早強ポルトランドセメントについて実験数が少ないので係数は求められなかったが実験結果を図-27に示す。

以上の方法により求めた図式により、ある程度の精度にて蒸気養生を行ない、1日2脱型行なう場合の脱型時の強度および7日、28日強度を推定でき、調合計画、養生計画を行なうことが可能である。

9. 結び

以上の調査の結果、コンクリートを蒸気養生する場合の調合と養生条件について次の事が言える。

9.1. 養生条件

(i) 最高温度 脱型時には高い方が有利であるが95°Cまで温度を高くするとむしろ強度の増進が悪くなる場合もあり、また長期強度への影響も考慮して、80°C前後にて養生するのが最適である。

(ii) 温度上昇勾配 脱型時では勾配の高い方が、同一 Maturity では養生時間が短くなるにもかかわらず強度は出るが、勾配を高くすると長期強度の伸びが著るしく悪くなるため20°C/hr以下にすべきである。

(iii) 前養生時間 長い程強度に対しては有効であるが、1日2回以上の脱型を望む場合1時間程度でもさしつかえない。

(iv) 単位水量 なるべく少なくし、硬練りのコンクリートを打つことが望ましい。

(v) 混和剤 1日2脱型する場合のようにならざるにきびしい養生条件にも安定性のある混和剤は見当らないので、混和剤を使用する場合には、試験により混入量を決定しなければならない。

(vi) セメント 蒸気養生用には、早強、シリカ、普通ポルトランドセメントが良いようである。

(vii) Maturity 一部に強度との相関を否定して

いる報告も見受けられるが、ある範囲の条件下では Maturity 強度の概念は成り立つので一概に否定できない。特にこの概念は初期強度の推定、養生計画を行なう上では有用な手段である。

9.2. 圧縮強度の推定 (空中養生)

圧縮強度は下式で表わされる。

$$F_0 = (A \log M + B)C/W + C \log M + D$$

$$F_7 = A C/W + B \quad F_{28} = A C/W + B \quad F_{28} = A F_7 + B$$

ここで、F₀=脱型時強度、C/W=セメント水比

M=Maturity A, B, C, D=定数(セメントの種類、適用範囲により決まる)

以上の調査結果より、ある程度の精度にて、蒸気養生を行ない1日2脱型する場合の調合計画、養生計画は実施可能である。しかし圧縮強度以外の各種物理性状については、まだ不明確な点が多いので今後この方面の研究が必要である。また圧縮強度の推定についても、全養生条件を加味した一般的な推定式を立てる必要がある。

参考文献

- 1) ミロノフ, マリニナ共著, 田辺訳: コンクリートの硬化促進
- 2) 松井, 横山, 笠井, 平賀: 混合セメントを用いたコンクリートの高温蒸気養生に関する研究, 学会 39年
- 3) 河野, 江村, 木下: 蒸気養生後の養生条件がコンクリートの圧縮強度におよぼす影響, セメント技術年報
- 4) 河野, 江村, 木下: 各種混和剤を使用したコンクリートの高温養生, 小野田中研報告
- 5) 篠沢: 蒸気養生コンクリートの圧縮強度に関する研究, 建築研究報告第52号
- 6) 向井: コンクリートの高温養生に関する研究, 学会第1報~第10報
- 7) 篠沢: コンクリートの蒸気養生に関する研究 学会その1~その6
- 8) Low Pressure Steam Curing Reported by ACI Committee 517
- 9) Optiman Steam Curing Procedure in Precasting Plants, Discussion of a paper by J. A. Hanson
- 10) Effect of Steam Curing on the Important Properties of Concrete, by ELMO. C. HIGGINSON ACI.
- 11) 大石, 尾崎, 遠藤: 蒸気養生がコンクリートの耐凍結融解性におよぼす影響, セメント技術年報

- 12) KOHNO; Relation Between Water-Cement Ratio and Strength of Concrete Used for Precast Elements
- 13) E.G. Swenson; Estimation of Strength gain of Concrete, Eng. J.
- 14) J.A. HANSON; Optimum Steam Curing Procedures for Structural Light weight Concrete
- 15) Paul Kliegert: Effect of Mixing and Curing Temperature on Concrete Strength.
- 16) 川越：蒸気養生におけるコンクリートの強度発現および熱応力，セメント技術年報
- 17) 松井，笠井，横山，平賀：蒸気養生コンクリートの強度推定(試論)，学会関東支部
- 18) 清原：軽量コンクリートの蒸気養生，北海道寒地研究所報(昭41)
- 19) 木村，秋浜，宍戸，武井，中島，阿部：蒸気養生コンクリートの実験研究その1～その6 学会
- 20) 高橋，森，小松：コンクリートの蒸気養生に関する研究，第1報～第4報 大林技研研究報告
- 21) 高橋，森，小松：コンクリートの蒸気養生に関する研究，学会号外，41. 42. 43年