

コンクリートの高温高圧蒸気養生について

室蘭工業大学 工修 尾 崎 詔
函館ドック(株)室蘭製作所 村 井 英 治

1. ま え が き

コンクリートの圧縮強さは材齢にともなって増加するがその増加率は養生の方法によって異なる。この養生に関する基本的な考え方は温度と湿度とによるものであって、コンクリート部材の設計施工については標準養生による材齢28日における圧縮強さが基準になっている。

しかし実際問題として材齢28日という期間は実に待ちどおしく、もしこれが数日あるいわ数時間で終わることができればどんなによいことか。このことは、コンクリートの配合設計の場合、あるいはプレキャストコンクリート製品を製作する場合などには特に要求される研究課題であって、すでに初期高温養生に関する研究などもなされ⁽¹⁾、プレキャストコンクリート工場における蒸気による初期高温養生は常識となっている。この方法によって3~4日で標準養生の場合の材齢28日強度の80%程度を得ることができるようにはなったが、この方法では大気中におかれたコンクリート部材に蒸気をかけるのであるから放出蒸気の損失が大きく、またこれに関する研究結果では60℃以上の高温はコンクリート強度に有害であるといわれている。したがって、コンクリートの硬化を促進させる高温度も60℃程度が限度となる。しかしこれは大気圧のもとにおける場合であって高圧のもとではこの限界温度も変わってくるであろうし、2, 3の研究結果によれば高圧のもとでは温度の害が現われないことも予想される⁽²⁾⁽³⁾。そこでコンクリート製品を密閉室(圧力缶)内に蒸気養生することが考えられる。この方法によれば高圧下で高温蒸気を利用することができるので従来の養生の基本となっている温度と湿度のほかに圧力の影響を与えることができる。この方法によれば圧力によってコンクリートの強度を増大させることができると同時に水蒸気が少なくすむようになる。

このような理由から圧力缶(オートクレーブ)を利用した高温高圧蒸気養生が考えられる。この養生方法は“High Pressure Steam Curing”として古くから欧米では研究されていたものであるが⁽⁴⁾、当時のコンクリート製品が現在のプレキャスト製品ほど高価でなかったことと、配合設計法にしても現在ほど進歩していなかったためか、コンクリートに対する応用的研究はその後コンクリートブロック会

社にておこなわれている程度で、むしろこの種の研究の成果は、アメリカの Calsi-crete, ソ連の Silicalit, スウェーデンの Ytong などの建築材料に見られるように珪酸質物質と生石灰の微粉末を高温高圧蒸気養生にて硬化させるといった方向に発達してきた。しかし、このような製品は弾性係数が小さく、土木構造物の主材としては使えそうもない。やはり従来のコンクリート自体をこの種の養生法にて製造する必要がある。

本研究はプレキャストコンクリート部材の短期間製造、およびコンクリートの配合設計の短期間完了などが要求される現在、高温高圧蒸気養生(圧力缶を用いるのでオートクレーブ養生と呼ぶ)による強度発現の促進の程度を調べようとするものである。

2. オートクレーブ養生装置

コンクリートのオートクレーブ養生は、オートクレーブ内にコンクリートを搬入し、扉を締め密閉室としたのち高温の飽和蒸気を送り、一定時間高温高圧蒸気中でコンクリートを養生するものであって、養生終了後蒸気を放出しオートクレーブ内の圧力を大気圧まで下げてから搬出されたコンクリートがすでに硬化を完成していることを理想とする。

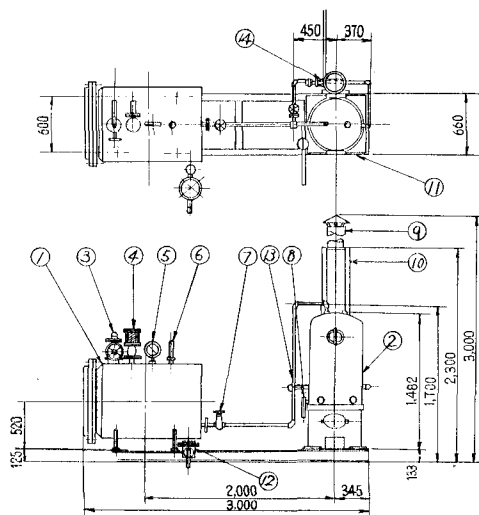


図-1 実験用オートクレーブ養生装置

本実験に使用したオートクレープ養生装置は HD 式コンクリート養生装置と名付けてコンクリートのオートクレープ養生プラントを開発している函館ドック室蘭製作所製の試験用オートクレープである。図-1 にこの構造のあらましを示す。

この試験用オートクレープの主要項目は次の通りである。

最大使用圧力	7 kg/cm ²
最大温度	169°C
オートクレープ容積	φ 60 cm×120 cm

この養生装置による養生操作は約 2 時間で 0 から 7 気圧 (169°C) まで直線的に昇温、昇圧し、目標とするオートクレープ養生時間中この圧力 (温度) を一定に保持し、養生時間終了とともに減圧し扉を開いて常温とした。

なお、本実験装置では 7 気圧までしか昇圧できないので 2, 3 の供試体について富士セメント研究室にあるセメント試験用オートクレープにより 10 気圧養生もおこなった。

3. 実 験

(1) 概 要

実験は ① モルタルのオートクレープ養生、② 鉄筋コンクリートあるいはプレストレストコンクリート桁、杭などを対象とした富配合コンクリートのオートクレープ養生、③ コンクリートブロックなどを対象とした貧配合コンクリートのオートクレープ養生の 3 種についておこなった。

(2) モルタルに関する実験

この実験はコンクリートに対するオートクレープ養生の予備実験として実施したものである。

a. 使用材料

セメントはアサノ普通ポルトランドセメント (比重 3.14, 粉末度 3,060 cm²/g) およびアサノフライアッシュセメント B 種 (比重 3.01, 粉末度 3,040 cm²/g) を使用した。

細骨材としては豊浦産標準砂 (比重 2.61) を使用した。

混和剤としては日曹ボゾリス No. 5, シーカプラスチックリット, タイオン油脂グラリオン 49 などを使用した。

b. 配 合

配合は水セメント比 $w/c=65\%$, セメント:砂=1:2 の 1 種とし、混和剤の添加量はそれぞれセメント量の 0.5%

とした。

c. 供試体の製作

供試体は JIS のセメント強さ試験に準じ、4×4×16 cm のモルタル供試体とした。20 時間後に脱型し、次の養生をおこなった。

d. 養 生

養生方法は次の 5 通りとした。

- (i) 20°C 湿潤箱にて標準養生
- (ii) オートクレープにて 5 時間養生
- (iii) 炭酸ガス 100% 填充オートクレープにて 5 時間養生
- (iv) 炭酸ガス 50% 填充オートクレープにて 5 時間養生
- (v) 炭酸ガス 50% 填充オートクレープにて 3 時間養生

e. 試 験 結 果

材齢 3 日, 7 日, 28 日にて曲げ強さ, 圧縮強さを試験した。その主なものとして混和剤を用いない場合の 2 種のセメントに対する圧縮強さの試験結果のみを示すと表-1 のようになる。

これを見ると、普通ポルトランドセメントの場合、5 時間のオートクレープ養生を用いることにより標準養生の材齢 28 日強度の 80% に相当する強度を得ることができる。また、フライアッシュセメントでは自然養生の材齢 28 日強度の 140% に相当する強さをオートクレープ養生直後 (3 日に試験) において得られる。したがってオートクレープ養生においてフライアッシュセメントの利用あるいはフライアッシュの添加は効果があることがわかる。

なお、普通ポルトランドセメントに対し炭酸ガスを利用することによっても標準養生における材齢 28 日強度に相当する強さを直ちに得られる。この炭酸ガスの効果はセメントの水和反応の過程において生成する $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と CO_2 とを反応させて $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ とし、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の濃度を低下させることにより水和反応を促進させることにある。しかし、これはコンクリートの中性化を促進させる結果となり鉄筋コンクリートでは鉄筋を錆びさせることになるかもしれないが、コンクリートブロックなどの無筋コンクリートに対しては応用できる。

また、オートクレープ養生時間については 3 時間よりも 5 時間の方が高く、やはり養生時間は長いほど効果があるようである。

表-1 モルタルの圧縮強度 (kg/cm²)

	普通ポルトランドセメント			フライアッシュセメント		
	3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日
標準養生	149	206	346	88	106	213
オートクレープ 5 時間	280	294	328	295	317	388
CO ₂ =100%, オートクレープ 5 時間	335	361	352	304	326	329
CO ₂ =50%, オートクレープ 5 時間	286	334	362	234	286	327
CO ₂ =50%, オートクレープ 3 時間	267	336	320	220	266	271

表-2 示 方 配 合

配合記号	最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	w/c (%)	s/a (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)
A	25	6±2	42	36	176	420	640	1180
B	25	3±1	42	50	160	380	940	940

(3) 富配合コンクリートに関する実験

この実験は鉄筋コンクリートあるいはプレストレストコンクリート部材を対象とした富配合コンクリートについて実施したものである。

a. 使用材料

セメントはアサノ普通ポルトランドセメント(比重 3.14, 粉末度 3,060 cm²/g)を使用した。

細骨材は富岸産の砂(比重 2.55, 吸水量 1.74%, 粗粒率 1.93)を使用した。

粗骨材は鶴川産の砂利(比重 2.62, 吸水量 1.82%, 粗粒率 7.37)および梶原産碎石(比重 2.68, 吸水量 1.89%, 粗粒率 7.31)を使用した。最大寸法はいずれも 25 mm である。

b. 配合

配合は鶴川産砂利に対しては表-2に示す A, B 2 種とし, 梶原産碎石に対しては A 種のみについておこなった。

c. 供試体の製作

供試体寸法は $\phi 15\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ の円柱供試体である。コンクリートは傾斜混合型パッチミキサを使用して 1 種類 6 本分の練り混ぜをおこない, 2 層に分けて供試体型枠に填充し棒状バイブレーターにて振動締固めをおこなった。

d. 養生

養生は次の 3 種とし, それぞれについて試験日まで空中放置と水中養生をおこなった。

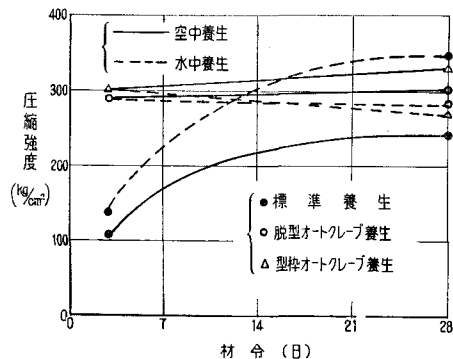
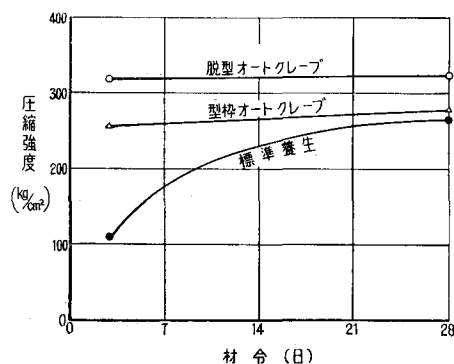
- (i) 標準養生: 24 時間後に脱型し, 20°C の水中養生。
- (ii) 型枠オートクレーブ: 24 時間後に型枠のままオートクレーブ養生。
- (iii) 脱型オートクレーブ: 24 時間後に脱型し, オートクレーブ養生。

なお, オートクレーブ養生についてはいずれも 7 気圧(169°C)で 5 時間養生した。0~7 気圧までの昇圧は直線的に 2 時間でおこなった。

e. 試験結果

鶴川産砂利を用いた配合 A ($w/c=42\%$, $s/a=36\%$, $w=176\text{ kg/m}^3$) の場合について各種養生による材齢と圧縮強度の関係を示すと図-2 のようになる。

これを見ると 7 気圧 5 時間のオートクレーブ養生によって標準養生の場合の材齢 28 日強度の約 85~90% に相当する圧縮強さのものが直ちに得られる。しかし, この場合材齢にともなう強度の増加率が小さく, 材齢 28 日強度でも標準養生の 90% 前後にとどまっている。これは型枠のままでも脱型して養生しても大体同じである。なお, オートク

図-2 鶴川産砂利 $s/a=36\%$ の場合図-3 鶴川産砂利 $s/a=50\%$ の場合

レーブ養生後水中にて養生したものでは強度が僅かながら材齢とともに減少している。これは静水圧のためと考えられるが, いずれにしてもオートクレーブ養生をおこなったものは空气中に放置しておいて差しつかえなく, 水中養生を更におこなっても効果がないことがわかる。

次に同じ鶴川産砂利を用いた配合 B ($w/c=45\%$, $s/a=50\%$, $w=160\text{ kg/m}^3$) について試験して見ると図-3 のようになる。

これによれば型枠のまま 7 気圧 5 時間オートクレーブ養生をしたものでは標準養生における材齢 28 日強度の 96% に相当する強度を直ちに発現し, 材齢 28 日まで空气中に放置しておけば標準養生の強度を上まわる強さを示す。さらに脱型後オートクレーブ養生をしたものでは標準養生の 20% も上まわる強さを直ちに発現し, 材齢 28 日まで空气中に放置しておいても強度の減少は見られず優れた効果を示している。このことはオートクレーブ養生では s/a が大きいほど効果があることを示している。(図-2 と 図-3 を比

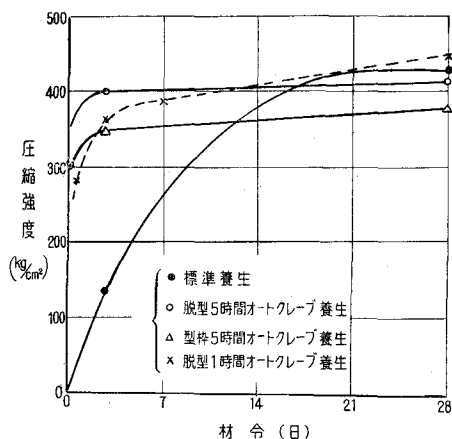


図-4 梶別産碎石 $s/a=36\%$ の場合

較するとよい。

次に梶別産碎石を用いた配合 A のコンクリートについて、その結果を示すと図-4 のようになる。これによれば、型枠のままオートクレーブ養生をした場合には標準養生の材齢 28 日強度の 80% 程度の強さを直ちに示し、脱型した供試体についてオートクレーブ養生をした場合には 90% 以上の強度を直ちに発現し、その後空気中においても僅かながら強度の増加が見られ材齢 28 日では標準養生と殆んど同じ位の強さを示している。

これを図-2 の砂利の場合と比較してみると同じ配合ながら碎石と砂利では強度の大きさにかなりの差がある。この理由は鶴川産砂利の品質があまり良くなかったことにもよるがセメントペーストあるいはモルタルとの付着強度が一

つの要素になっているように思われる。なお(図-4)において点線で示したものは養生時間を 1 時間と極めて短縮した場合であるが、オートクレーブ直後の強度発現は 5 時間オートクレーブに比べて小さいが材齢 52 日では 480 kg/cm^2 という強度を有し、オートクレーブ直後の 70% の増加率を示している。したがってオートクレーブ養生の時間的操作法による強度発現の状態を十分研究することにより目的に応じたコンクリートの強度を発現させ得ることが予想される。

(4) 貧配合コンクリートに関する実験

この実験はコンクリートブロックなどの無筋コンクリート製品を対象とした貧配合コンクリートについて実施したものである。

a. 使用材料

セメントは富士普通ポルトランドセメント(比重 3.15, 粉末度 $3,230 \text{ cm}^2/\text{g}$)を使用した。

混和材として北電フライアッシュ(比重 2.11, 粉末度 $2,791 \text{ cm}^2/\text{g}$)を用いた。

細骨材には富岸産の砂(比重 2.60, 吸水量 1.74%, 粗粒率 1.93)を用いた。

粗骨材には静内産砂利(比重 2.69, 吸水量 1.73%, 粗粒率 7.15)を使用した。

b. 配合

配合は次の表-3 に示す A, B 2 種とした。なお、この A, B 2 種についてそれぞれフライアッシュを添加してみたが、その量は配合 A についてはセメント量の 20% および 40% をフライアッシュにて置換し、配合 B についてはセメント量の 20% だけフライアッシュで置換えてみた。

表-3 示 方 配 合

配合記号	最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	W (kg/m^3)	C (kg/m^3)	w/c (%)	s/a (%)	S (kg/m^3)	G (kg/m^3)
A	25	0	113	260	45	43	880	1200
B	25	0	117	230	49	43	890	1210

c. 供試体の製作

供試体は富配合の場合と同様に $\phi 15 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 円柱供試体および $\phi 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 円柱供試体の双方を用いた。

コンクリートはスランプ 0 cm の極硬練りで普通のミキサーでは練れないので 1 種類 6 本分を手練りにより混合した。締固めは棒状バイブレーターによっておこない、かつ 7 kg/cm^2 の加圧力を 10 分間おこない直ちにセメントペーストによりキャッピングした。

d. 養生

養生は次の 4 種とした。

- 標準養生: 24 時間後に脱型し、 20°C の水中養生。
- 脱型オートクレーブ: 24 時間後に脱型し、オートク

レーブ養生。

- 即時型枠オートクレーブ: 打設後直ちに型枠のままオートクレーブ養生。

- 即時脱型オートクレーブ: 打設後直ちに脱型し、オートクレーブ養生。

なお、この実験ではオートクレーブ養生時間を 7 気圧で 1.5 時間、2 時間、5 時間の 3 種に変えてやってみた。

また、10 気圧にて 2 時間のオートクレーブ養生も試みた。

e. 試験結果

配合 A の場合について 7 気圧養生の試験結果を示すと表-4 のようになる。

表—4 オートクレープ養生時間による圧縮強度

フライアッシュ $F/C+F$ (%)	標準養生 材齢28日強度 (kg/cm^2)	オートクレープ直後～材齢28日強度 (kg/cm^2)			
		養生の種類	1.5 時 間 オートクレープ	2 時 間 オートクレープ	5 時 間 オートクレープ
0	299	24時間後脱型	—	271～235	292～263
		即時脱型	162～163	—	—
		即時型枠	158～158	—	280～241
20	259	24時間後脱型	—	190～213	277～255
		即時脱型	143～195	—	—
		即時型枠	178～180	—	263～211
40	180	24時間後脱型	—	—	195～212
		即時脱型	—	—	138～100
		即時型枠	—	—	143～88

表—5 オートクレープ圧力を変えた圧縮強度

配合記号	フ ラ イ ア ッ シュ $F/C+F$ (%)	標準養生 28日強度 (kg/cm^2)	オートクレープ養生 後の強度 (kg/cm^2)	
			7 気 圧 (169°C)	10 気 圧 (183°C)
A	0	299	271	279
	20	259	190	244
B	0	—	234	232
	20	199	220	260

この結果を見るとオートクレープ養生時間は長いほどよく、7気圧5時間のオートクレープ養生で大体標準養生における材齢28日強度を得ることができる。また養生開始時期はコンクリート打設後直ちにおこなうよりも24時間程度経ってから脱型しておこなった方がよい。なお型枠のまま養生しても、脱型して養生しても大差ないようである。

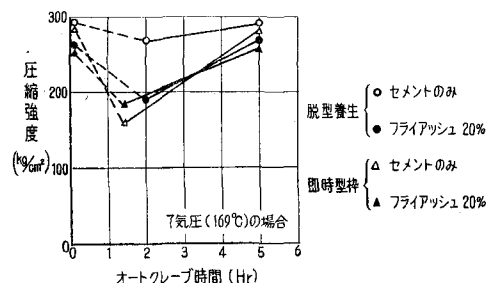
また配合A、Bの場合について24時間後に脱型し、2時間オートクレープ養生をした直後の圧縮強度を調べてみると表-5のようになる。

これによれば貧配合のコンクリートのオートクレープ養生においてフライアッシュの添加は効果があり、しかも高圧オートクレープ養生ほどその効果が著しい。表-5の結果は2時間オートクレープの場合であるから表-4の結果を合わせて考えると、10気圧で長時間オートクレープ養生をすれば標準養生による材齢28日強度をはるかに上まわる強度を直ちに得ることができそうである。

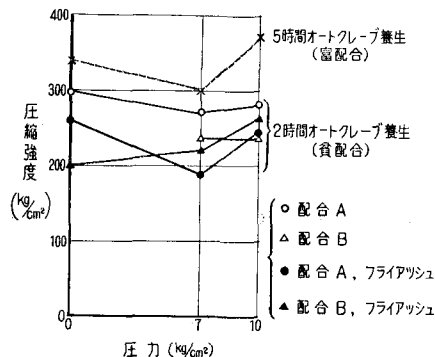
4. 考 察

以上のモルタルおよびコンクリートに対するオートクレープ養生の結果を総合して見ると次のことがわかる。

まず、オートクレープ養生時間は貧配合コンクリートの実験結果から図-5のようにオートクレープ養生時間が長



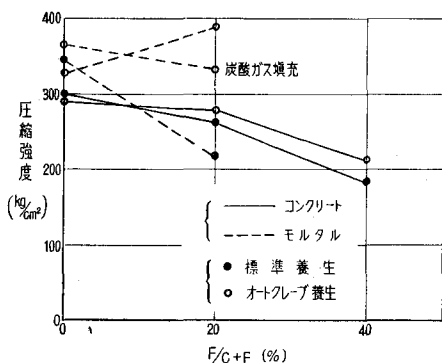
図—5 オートクレープ養生時間の影響



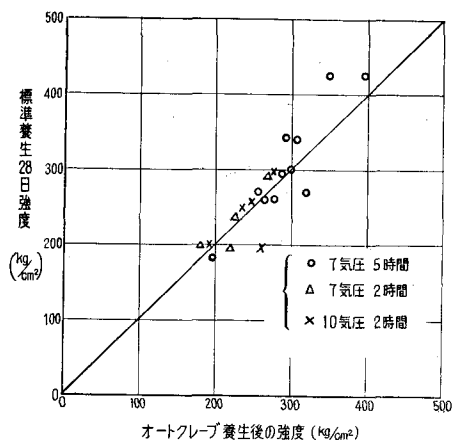
図—6 オートクレープ圧力の影響

いほど強度が高くなり、7気圧(169°C)のオートクレープ養生の場合5～6時間で標準養生の材齢28日強度に相当する圧縮強さを得る。

またオートクレープ養生時の圧力については、図-6のように2時間オートクレープ養生の場合、圧力が大きいほど強度が大きくなっているが、10気圧(183°C)の圧力でもオートクレープ養生時間が2時間程度では標準養生における材齢28日強度にはおおよそ、点線で示した富配合の場合の5時間オートクレープ養生では7気圧から10気圧に圧力を上げることによって著しく強度が大きくなっていることを見ても10気圧5時間以上のオートクレープ養生が最適



図—7 フライアッシュおよび炭酸ガスの影響



図—8 オートクレープ養生直後強度と標準養生との関係

と思われる。

なお、図-7 にてわかるように、オートクレープ養生における特徴の一つとして、フライアッシュなどのシリカ質混和材あるいは炭酸ガスなどが標準養生の場合には考えられないほどの効果を示し、それは細粒の骨材の多いコンクリートほど著しいようである。これはいずれもセメントの水和反応にて生ずる $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と反応することにより OH^- の濃度を低下させ水和を促進させるためと考えられる。

最後にコンクリートの配合設計を対象としてオートクレープ養生の結果を考察してみると図-8 のような関係となる。これによれば 300 kg/cm^2 以下の強度では 7~10 気圧で 2~5 時間のオートクレープ養生をすることによって直ちに標準養生による材齢 28 日強度を推定することができる。ただし、 300 kg/cm^2 以上の強度では 7 気圧 5 時間のオートクレープ養生では不足であり、10 気圧 5 時間以上のオートクレープ養生を採用すれば標準養生による材齢 28 日強度に相当する強さが得られるであろう。

5. あとがき

オートクレープ圧力 7~10 気圧、オートクレープ養生時

間 1.5~5 時間の範囲内での実験から次のことがいえる。

(1) 適当なオートクレープ圧力およびオートクレープ養生時間を選べば、標準養生における材齢 28 日強度に相当する圧縮強度あるいはそれ以上の圧縮強度を直ちに得ることができる。そのためには、7~10 気圧で 5 時間以上の養生が要求される。

(2) 一般にはオートクレープ養生の直後に得られた強度はその後材齢とともに殆んど増加しない。これはオートクレープ養生後水中養生などを施してもこの点は改良されない。したがって目標とする圧縮強度をオートクレープ養生直後に得る必要がある。

(3) オートクレープ養生開始の時期はコンクリート打設直後でも、あるいは脱型に必要な強度が得られる 24 時間後でも大差は見られないようであるが、できれば 24 時間ほど経過してから開始した方がよい。これは特に脱型養生の場合、まだ固まらないコンクリートではその表面のペースト分が高圧蒸気にて流れるからである。

(4) オートクレープ養生の場合にはフライアッシュなどのシリカ質混和材あるいは炭酸ガスなどは標準養生の場合よりも効果が十分発揮される。このことはオートクレープ圧力が高く、養生時間が長いほど顕著にあらわれる。

(5) コンクリート製品に対してオートクレープ養生を利用する場合には蒸気圧に対応する温度変化の影響があるので、骨材とモルタルあるいはペーストとの付着が害されるから、細骨材の多い最大寸法の小さいコンクリートが有利であり、砂利よりは砕石が適している。また、鉄筋コンクリートに対しては鉄筋の付着の点から丸鋼は使用できず、異形鉄筋の使用が要求される。この点については目下実験中である。

また、以上の問題に加えて、オートクレープ養生をおこなったコンクリートの弾性的性質は普通のコンクリートとは異なるようなので、この点についても目下研究中である。

なお、実験は主として室蘭工科大学土木工学科実験室において志村政雄、田中功両氏の協力のもとにおこなった。実験装置は函館 Dock 室蘭製作所で製作され、同社の好意により実験の機会を得た。実験の一部は富士セメント研究室の各位の協力を得た。本研究に関連した実験に日本高圧コンクリート栗山工場の各位の協力も得た。ここにあわせて記し、関係各位に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 横道英雄・松井司：初期高温養生のコンクリートにおよぼす影響について、セメント技術年報，昭 32。
- (2) 岡田清，他：コンクリートの加圧養生に関する 2, 3 の実験，セメント技術年報，昭 37。
- (3) 岡田清，他：コンクリートの強度推定法に関する一考察，土木学会年次学術講演会講演概要，昭 38。
- (4) Harold J. Levine: High Pressure Steam Curing. Jour. of A.C.I. 1944, Vol. 15, No. 5.