

[28] 高強度コンクリート用混和材料に関する研究

正会員 重 倉 祐 光 (東京理科大学理工学部)
 正会員 ○高 橋 和 雄 (東京理科大学理工学部)
 正会員 棚 野 博 之 (東京理科大学大学院)

1. まえがき

近年、建築物の多様化に伴い構造に対する要求は高性能化し、高強度コンクリートの必要性が高まっている。コンクリートを高強度化すれば、部材断面が減少して経済的になるばかりでなく、コンクリート部材のプレキャスト化が容易になり、品質管理、耐震、耐久性の面でもメリットが得られる。コンクリートの高強度化するための方法は幾多もあるが、本研究では石膏とセメントの水和生成物の膨張による収縮低減作用や初期強度増進作用に着目し、硬石膏を高強度用混和材(以後混和材と略)として用い、加えて高性能減水剤の高い減水能力と促進養生を併用する事によって高強度コンクリートを得る事を目的とした。又、現状の高強度コンクリートを得る為の方法はオートクレーブ養生を用いるのが一般的であるが、多額の設備投資やエネルギーコストを必要とする事から本研究では促進養生としては蒸気養生に止める事の可能性も検討した。

2. 実験概要

本実験は2つのシリーズに分けて行なった。使用材料は表-1に示す通りである。両シリーズともSA:42%目標スランプ5cmとした。測定項目は圧縮強度(JISA1108)、乾燥収縮(JISA1126)等である。

Iシリーズ:混和材が強度に及ぼす影響を調べる為に行なった実験で、高性能減水剤の種類・添加量、単位セメント量等表-2に示す各要因について試験した。養生方法は、標準・蒸気・オートクレーブの3種類とした。

IIシリーズ:混和材と高性能減水剤を併用した場合の最適蒸気養生条件を調べる為に行なった実験で、その要因を表-3に示した。普通セメントを用い単位セメント量450kg/m³、高性能減水剤A種、1.5%添加で行った。

3. Iシリーズの結果及び考察

1)混和材混入量:実験結果を図-1、2に示した。蒸気養生を行なった場合、混入量5~10%で川砂利使用の場合50~70%、碎石使用の場合で約15%の強度増加が認められた。これは混和材がセメントのアルミネート相と反応してエトリンガイトを生成しセメントの水和反応を促すためと考える。しか

表-1 使用材料

セメント	普・ポ・セ ρ:3.15 K:425	早・ポ・セ ρ:3.13 K:460
粗骨材	川砂利 ρ:2.57 吸:2.50 実66.0	碎石 ρ:2.63 吸:1.92 実64.0
細骨材	川砂 ρ:2.60 吸水率:1.40 実積率:70.5	
混和材	硬石コウ系 ρ:2.87 ブレーン値:8000 (cm ² /g)	
高性能減水剤	A (液体)	B (液体)
	ρ1.21 C×0.6~2.4%	ρ1.14 C×0.6~3.2%
	C (液体)	
	ρ1.22 C×2.0%	

表-2 Iシリーズの要因と水準

要因	水準				
混和材混入量	0, 5, 10, 15 (%)				
高性能減水剤	種類	—	A	B	C
	添加率	0	1.0, 1.5	2.0, 3.0, 4.0	2.0
セメント種類	普通ポルトランドセメント, 早強ポルトランドセメント				
単位セメント量	350, 400, 450, 500 (kg/m ³)				
練り上り温度	10, 20, 40 (°C)				
粗骨材種類	川砂利, 碎石				

表-3 IIシリーズの要因と水準

要因	水準
練り上り温度	20, 40 °C
前置温度	20, 40 °C
前置時間	3, 4.5, 6 h
昇温速度	9, 15, 45 °C/h
最高温度	65, 80 °C
最高温度保持時間	4, 6, 8 h

し、15%混入すると強度は大巾に低下し、この傾向は長期材令で特に顕著であった。この事から混和材混入量には明確な限界が認められたので使用には注意を要する。標準養生・オートクレーブ養生については、使用粗骨材によって傾向が異なり、混和材の混入はあまり効果が認められなかった。

2)高性能減水剤の種類と添加量：3種類の高性能減水剤の効果は養生方法や粗骨材の種類によって若干の差は認められたが、ほぼ同程度であった。最適添加量はセメント重量パーセントでA種1.5%、B種3.0%、C種2.0%であった。図-3にA種の添加量と圧縮強度の関係を示した。蒸気養生の場合、添加量の増加に伴い、混和剤との併用効果は顕著になり高強度が得られた。標準・オートクレーブ養生の場合は添加量の増加につれ強度は増すが、混和材混入による低下分を回復するには至らず、併用効果は認められなかった。

3)セメントの種類：早強セメントと普通セメントを比較した場合、蒸気養生で11%、標準養生で6%、オートクレーブ養生で37%早強セメントが高強度となった。材令1週から4週までの強度増加率は双方とも約15%で差は認められなかった。

4)単位セメント量：図-4に単位セメント量と圧縮強度との関係を示した。養生方法によって異なった傾向を示し、蒸気養生では500kg/m³に増加しても強度は増加しないが、標準・オートクレーブ養生では単位セメント量が多い程高強度となった。しかし弾性係数には差が認められなかった。

5)水セメント比：図-5に本実験より求めた養生方法別の水セメント比と圧縮強度の関係を示した。標準養生と蒸気養生は、ほぼ同じ傾きとなった。JASS 5、セメント協会の提唱式はこの様な低水セメント比を対象としてはいないが、本実験での推定値は両提唱式より高い値を示した。しかし、傾きは小さく、高強度域では、水セメント比の低減に伴う圧縮強度の伸びは少ない。

6)粗骨材の種類：図-6に粗骨材として川砂利を用いた場合と砕石を用いた場合の単位水量・圧縮強度の比較を示した。同一スランブを得るための単位水量は大巾に異なり、砕石を使用した場合単位水量は15~25kg/m³増加する。高性能減水剤の種類による差は認められなかった。粗骨材の実績率の差が2%である事も考え合せると、高性能減水剤を使用した事により粘性が高まり、低スランブ域では粒形の影響が大きくなると考える。圧縮強度を比較すると、砕石は川砂利より100kg/cm²以上も増加している。これは、粗骨材自身の強度が高い事と、粒形の悪さによるセメントペーストと骨材の付着強度の増大による。養生方法による差は認められなかった。

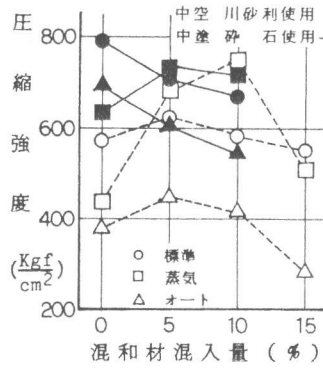


図-1 混和材混入量一圧縮強度

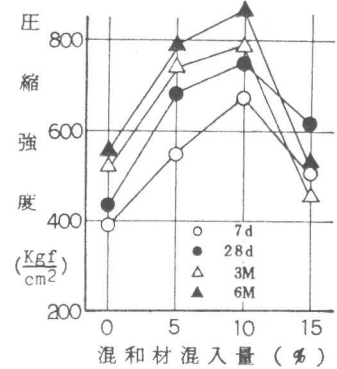


図-2 混和材混入量一圧縮強度

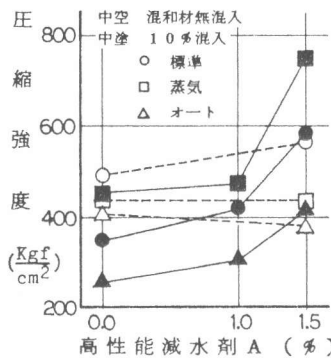


図-3 添加率一圧縮強度

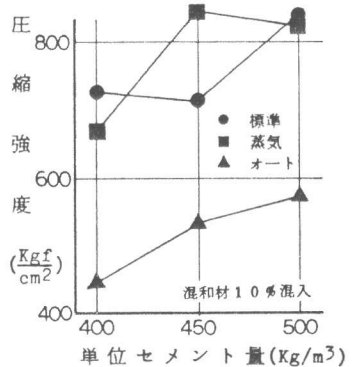


図-4 単位セメント量一圧縮強度

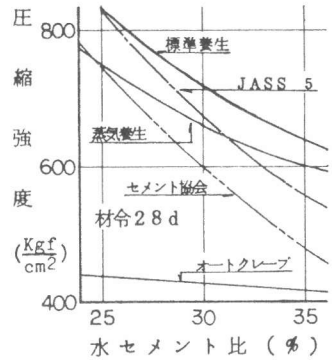


図-5 水セメント比一圧縮強度

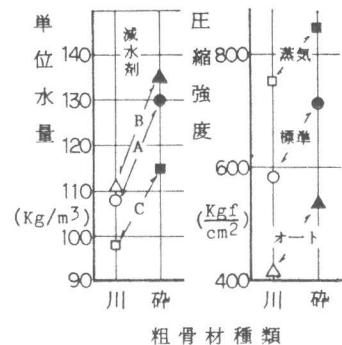


図-6 粗骨材種類一単位水量 圧縮強度

4. IIシリーズの結果及び考察

1)練り上り温度：図-7に練り上り温度と圧縮強度の関係を示した。混和材を混入した場合は40℃までなら練り上り温度は高い方が高強度となり、この傾向は混入量10%で顕著であった。しかし、材令13週になるとその差は少なくなる。この事から混和材を混入した場合は、ホットミキシングに適する。

2)前置時間：図-8に前置時間と圧縮強度の関係を示した。前置時間が3時間から6時間の間では混和材混入量によって傾向の違いは有るものの、前置時間が長い方が高強度となり、特に混入量10%の場合は前置時の影響は大きい。以上の事から前置時間は可能であれば出来るだけ長くするとよい。

3)最高温度保持時間：結果を図-9に示した。混和剤を混入しない場合には最高温度保持時間は4時間が高強度となり、それ以上増加させても圧縮強度は低下した。混和材を混入した場合は混入量にかかわらず6時間が適当となった。最高温度保持時間は硬化促進作用を増大させるが、水和物が結晶表面部分に緻密な反応層を形成し、蒸気養生後の水和反応を抑制する事も考えられ、最高温度保持時間の長すぎる場合は強度が低下する。

4)昇温速度：図-10に昇温速度と圧縮強度の関係を示した。蒸気養生を行なう場合の昇温は混和材混入量に拘わらず緩やかな程良く、昇温速度は9℃/hが適当と考える。

5)最高温度：蒸気養生の最高温度を65℃から80℃に変化させた場合、混和材混入量の多い程、圧縮強度は増加する。又、長期材令においても高温養生による強度低下は認められなかった。しかし最高温度の違いによる圧縮強度の変化は他の養生に比較して小さく、エネルギーコストの面から考えると必ずしも有効だとは考えられない。従って最高温度は65℃で充分であると考ええる。

6)前置温度：ホットミックスを行って練り上り温度40℃とした場合の前置温度と圧縮強度の関係を図-11に示した。混和材混入量に拘わらず、前置温度20℃が高強度となった。これは3)最高温度保持時間の項で述べたセメント粒子周りの皮膜形成作用が早まる事とはほぼ同様の理由と考える。

7)混和材混入量と養生条件：混和材混入量に伴う養生方法別の圧縮強度推定式を図-12に示した。混和材の混入は、特に蒸気養生と併用する事によって大きくなるが、混入量には限界が有る事も認められ5~10%が最適混入量と考える。回帰式の反極点も蒸気養生で9.1%、標準養生で6.4%であった。蒸気養生の温度と時間を掛け合せた積算温度を調べると、混和材混入量の10%で6000℃・hを

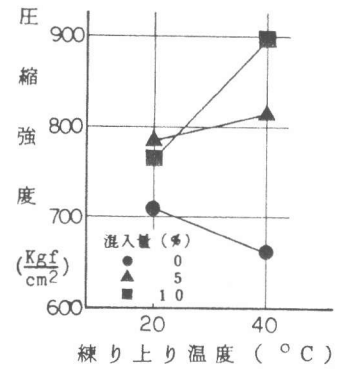


図-7 練り上り温度—圧縮強度

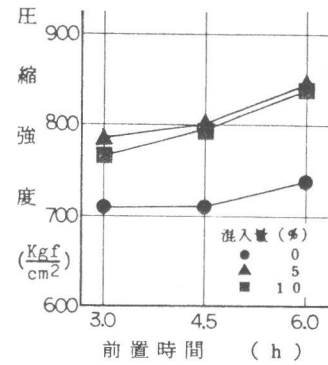


図-8 前置時間—圧縮強度

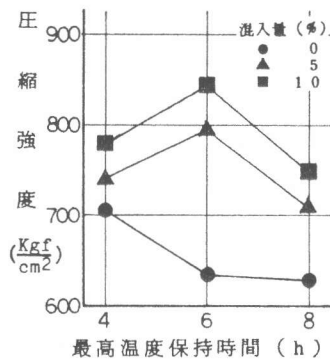


図-9 最高温度保持時間—圧縮強度

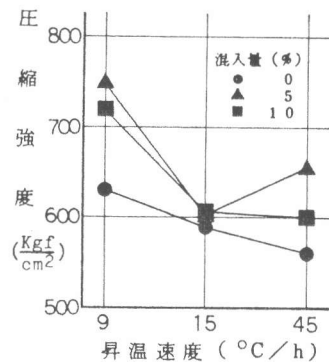


図-10 昇温速度—圧縮強度

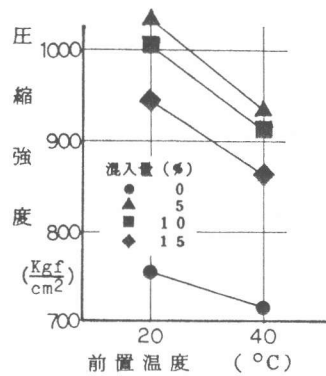


図-11 前置温度—圧縮強度

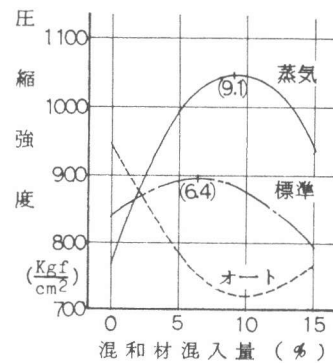


図-12 混和材混入量—圧縮強度

越えると強度は低下し、5%と無混入の場合には600~800℃・hで最も強度が高くなった。

5. その他の性質

1) 乾燥収縮率：図-13に乾燥収縮試験結果の一例を示した。収縮率の関係を不等式で表わすと次のようになる。プレーン>高性能減水剤使用>高性能減水剤+混和材 これは高性能減水剤の減水効果により単位水量が小さくなったこと、混和材とセメントの水和生成物の膨張効果に起因すると考える。養生方法別では、標準養生>蒸気養生>オートクレーブ養生 となった。蒸気養生条件を変化させた場合は、混和材混入量によって、又蒸気養生の要因によって異なった性状を示した。混入量5%では練り上り温度は高い程、前置温度は6h昇温速度9℃/h、最高温度80℃で低収縮率となった。混和材混入量10%で5%より収縮率が大きくなる場合も多数認められた。

2) 曲げ強度：図-14に曲げ強度と圧縮強度の関係を示した。曲げ強度は混和材混入量や蒸気養生条件には関係なく、圧縮強度によって決定された。曲げ強度は圧縮強度の約1/8となり、一般に用いられているコンクリートと比較すると小さめである。

3) 引張強度：圧縮強度との関係は曲げ強度と同様であり、圧縮強度の1/13~1/18程度となった。一般のコンクリートが1/10~1/13であり、引張強度も圧縮強度程は増加しなかった。

4) 付着強度：付着強度は異型鉄筋を用いて、 $\tau_{0.002D}$ と最大付着応力度を試験した。圧縮強度との関係を図-15に示した。異型鉄筋を用いた為、付着強度はリブ部分の機械的抵抗に依存していると考えられ、フープ筋等による横方向の補強をすれば強くなるが、圧縮強度程の増加は認められなかった。これは、機械的抵抗が圧縮強度と引張強度の両方によって決まる為と考える。

5) 弾性係数：混和材を混入した場合は養生方法によって圧縮強度との相関は少なくなり、特に10%以上混入した場合は高強度域での静・動弾性係数の増加率は小さい。特に蒸気養生を行なった場合は、各要因によって圧縮強度と全く異なった傾向を示す場合も有った。これは高強度コンクリートを構造部材として使用する場合には注意が必要である。

6) ボアソン数：ボアソン数は混和材混入量や養生方法に拘らず、圧縮強度の1/3付近で最大となり約5.0、1/2付近で約4.5となった。普通コンクリートのボアソン数が約6.0であるので少し低い値となった。しかし、曲線は各部分とも同様な傾きであった。

6. まとめ

高強度コンクリートをオートクレーブ養生を用いなくて製造する場合の最適条件を表-4に示した。混和材と高性能減水剤を併用した場合の蒸気養生条件は、プレーンコンクリートの場合と多少異なる部分があり注意を要する。圧縮強度以外の強度は圧縮強度程増加しない。しかしオートクレーブ養生を用いなくて1000kg/cm²の圧縮強度を得られ、ホットミキシング向きである事からこれからのPC部材への利用価値は大きいと考える。

参考文献：日本建築学会 S56 大会号「起高強度コンクリート用混和材料の開発と利用に関する研究」重倉・高橋・棚野

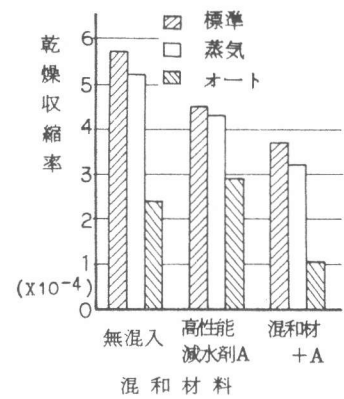


図-13 乾燥収縮率

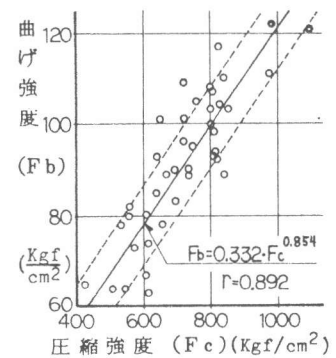


図-14 圧縮強度一曲げ強度

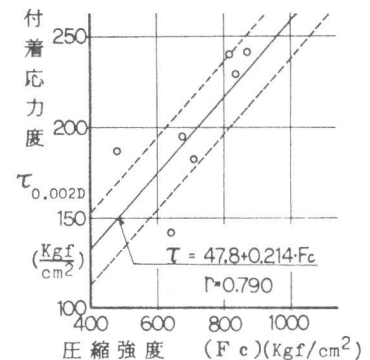


図-15 圧縮強度一付着応力度

表-4 最適条件

配合条件	混和材混入量	5~10%
	高性能減水剤	適量
	単位セメント量	450
蒸気養生条件	粗骨材	碎石
	練り上り温度	40℃
	前置時間	6 h
	前置温度	20℃
	昇温速度	9℃/h
最高温度	最高温度	65℃
	最高温度保持時間	6 h