

150N/mm² 級高強度コンクリートの調合に関する研究

－骨材種類や混和材料が圧縮強度や収縮に及ぼす影響－

Study on Mix Proportion of 150 N/mm² Class High-Strength Concrete

- Effects of Aggregates and Admixtures on the Compressive Strength and Shrinkage -

起橋孝徳* 河野政典* 上西 隆** 小竹琢雄***

要 旨

150N/mm² 級高強度コンクリートの実用化を目的として、基本的な調合実験を行うとともに、高強度コンクリートで問題視されている自己収縮についての検討を行った。その結果、水結合材比を約 14%以下に設定することで、設計基準強度 150N/mm² のコンクリート製造が可能であることを確認した。また、使用する骨材の種類が強度発現に大きな影響を及ぼすために材料選定が必要であることや、フレッシュコンクリートの粘性が高く、凝結に要する時間が長いことなど、施工上検討を要する点も明らかになった。自己収縮については、水結合材比による傾向などを確認し、その大きさが普通強度コンクリートの乾燥収縮に比べて特に大きくないことや、使用する結合材種類や混和材料による収縮低減効果を明らかにした。

キーワード：高強度コンクリート、圧縮強度、自己収縮、混和材料、骨材種類

1. まえがき

建築物の高層化・長スパン化にともない、柱のコンクリートに要求される強度は漸次高くなっている。その中で、当社では既に Fc100N/mm² 級のコンクリートを実用化し、都内の超高層RC造共同住宅の低層階で適用しているが、今後、更なる高強度化への対応が必要になることが予測される。このような背景から、Fc150N/mm² 級高強度コンクリートの実用化に向けて、基礎的性状を確認するための室内試験を行った。

Fc100N/mm² を超える高強度コンクリートにおいては、使用する粗骨材の品質がコンクリートの強度性状に大きな影響を及ぼすこと¹⁾や、自己収縮が顕著になること²⁾などが知られており、実用化に向けてこれらの点を検討する必要がある。このため、実験では、コンクリートの諸性状に対して、結合材種類や骨材種類による傾向を確認するとともに、収縮低減剤や膨張材の添加による影響を確認した。そこで得られた結果について報告する。

2. 実験計画

2.1 実験要因と使用材料

実験水準および試験項目の組合せを表-1に示す。実験では、水結合材比が 16~12%の調合について室内試

験練りを行って、フレッシュコンクリートの性状や凝結時間、簡易断熱養生における温度履歴、圧縮強度、ヤング係数、収縮傾向などを確認した。

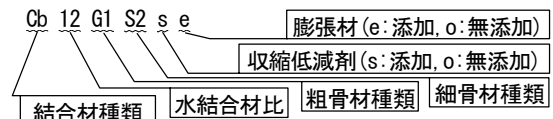
使用材料を表-2に示す。実験に用いる結合材は、低熱ポルトランドセメントをベースにシリカフュームをブレミックスしたもので、添加率が 15%以上のものと 10%のもの2種類を使用した。細骨材は山砂と砂岩砕砂、粗骨材は硬質砂岩碎石と石灰石碎石のそれぞれ2種

表-1 実験水準および試験項目組合せ

記号	結合材	粗骨材	細骨材	収縮対策 混和材料	水結合材比		
					12%	14%	16%
Ca**G1S1oo	Ca	G1	S1	なし	○△		
Ca**G1S2oo			S2		○△◇	○△	
Ca**G2S2oo		G2			○◇		
Cb**G1S1oo	Cb	G1	S1	なし	○◇	○	○◇
Cb**G1S2oo					○△◇	○△	○△◇
Cb**G1S2so					sr:B*2.0%	○△◇	
Cb**G1S2oe			ex:40kg/m ³		○△◇		○△◇
Cb**G1S2se			sr:B*1.0%		○△◇		○△◇
Cb**G1S2se			ex:20kg/m ³		○△◇		○△◇
Cb**G2S2oo	G2		なし	○◇	○	○◇	

※○：強度試験、△：凝結試験、◇：収縮計測

記号の凡例



*技術研究所 **技術本部建築部 ***東京支社建築工務部

類とし、収縮低減を目的とした混和材料には収縮低減剤と膨張材を各 1 種類、単独もしくは組み合わせて使用することとした。なお、いずれの水準においても、直径 17 μ m、長さ 10mm のポリエステル (PET) 製樹脂繊維を体積の外割りで 0.1% 混入した。

2.2 実験方法

調合およびフレッシュコンクリート試験結果を表-3 に示す。調合は目標スランプフロー 60 \pm 7.5cm、目標空気量 2.5 \pm 1.0% とした。高性能減水剤は試し練りによって予め添加率を設定し、固形分を補正した。AE 助剤は消泡剤を一律で結合材量の 0.01% 添加した。

コンクリートの製造は、容量 0.1m³ の水平 2 軸強制練りミキサーを使用した。練り混ぜの手順は、結合材と細骨材を投入して 15 秒空練りした後、水と混和剤を投入して、状態を観察しながら 90~240 秒練り混ぜてモルタルを製造し、そこに粗骨材と繊維を投入して 60 秒練り混ぜてコンクリートを製造した。フレッシュコンクリートの試験にあたっては、製造したコンクリートをミキサーの中で 5 分間静置した後、30 秒間の練り混ぜを行い、ミキサーからの排出後にも人力で練り返しを行ってから試験を実施した。

凝結時間は、練り上がりのコンクリートをウェットスクリーニングして採取したモルタルを用い、コンクリート自動凝結試験装置 (テスコ製) によって計測した。

圧縮強度は、 ϕ 10 \times 20cm の円柱供試体で、標準水中養生したものについて、材齢 7、28、56、91 日の強度試験を行った。また、一部の水準で、材齢 7 日まで簡易断熱養生を行った後、封緘養生としたものについて材齢

28、56、91 日の強度試験を行った。なお、簡易断熱養生中は熱電対により養生温度を計測した。

収縮計測は、各水準 2 体の試験体 (10 \times 10 \times 40cm) の中央部に、埋め込み型ひずみ計 (PMFL-60T、(株)東京測器研究所製) を埋設して、コンクリート打ち込み時からの挙動を連続計測した。試験体は、日本コンクリート工学会の自己収縮の試験方法²⁾に準じて製作し、型枠の底面に厚さ 1mm のテフロンシートを、両端部の内側に厚さ 3mm のポリスチレンボードを入れて、コンクリート試料はその内側で全面をポリエステルフィルムで覆われた形に打ち込んだ。養生方法は、表-1 で収縮計測と

表-2 使用材料

区分	記号：種類	物性値
結合材 (シリカフューム プレミックス セメント)	Ca: 高添加型	密度 3.01g/cm ³ , 比表面積 5650cm ² /g, シリカフューム添加率 15%以上
	Cb: 通常型	密度 3.08g/cm ³ , 比表面積 6350cm ² /g, シリカフューム添加率 10%
粗骨材	G1: 桜川産 硬質砂岩碎石	密度 2.65g/cm ³ , 吸水率 0.62%, 実積率 58.9%
	G2: 山口産 石灰石碎石	密度 2.69g/cm ³ , 吸水率 0.33%, 実積率 61.8%
細骨材	S1: 桜川産 砂岩砕砂	密度 2.60g/cm ³ , 吸水率 1.27%, F.M.2.73
	S2: 富津産 山砂	密度 2.60g/cm ³ , 吸水率 1.76%, F.M.2.46
混和剤	SP: 高性能減水剤	密度 1.07~1.13g/cm ³ , 固形分 30%
混和 材料	sr: 収縮低減剤	密度 0.950~1.050g/cm ³
	ex: 早強性膨張材	密度 3.19g/cm ³ , 比表面積 4520cm ² /g
繊維	PET 製樹脂繊維	密度 1.39g/cm ³ , 直径 17 μ m, 長さ 10mm

表-3 調合表およびフレッシュコンクリート試験結果一覧

記号	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)								sr 添加率 (B*%)	SP 添加率 (B*%)	練り 時間 (秒)	スランプ ϕ - (mm)	ϕ -時間 (秒)		空気 量 (%)	C. T ($^{\circ}$ C)
		W	B			S		G						50cm	停止		
			Ca	Cb	ex	S1	S2	G1	G2								
Ca12G1S1oo	12.0	140	1167	-	-	333	-	858	-	-	4.5	180	610 \times 605	34.9	236.6	3.5	21.5
Ca12G1S2oo	12.0	140	1167	-	-	-	333	858	-	-	4.5	210	630 \times 605	35.8	249.0	3.4	21.0
Ca12G2S2oo	12.0	140	1167	-	-	-	291	-	914	-	4.5	180	655 \times 640	21.3	200.0	2.7	21.0
Ca14G1S2oo	14.0	140	1000	-	-	-	478	858	-	-	2.3	180	640 \times 615	22.1	229.9	2.7	20.5
Cb12G1S1oo	12.0	150	-	1250	-	260	-	858	-	-	3.4	210	585 \times 565	55.0	192.4	3.0	22.0
Cb14G1S1oo	14.0	155	-	1107	-	369	-	858	-	-	2.2	120	590 \times 585	30.0	133.8	2.2	22.0
Cb16G1S1oo	16.0	160	-	1000	-	445	-	858	-	-	1.7	90	530 \times 520	31.4	121.2	2.6	21.0
Cb12G1S2oo	12.0	150	-	1250	-	-	260	858	-	-	3.4	210	645 \times 640	33.3	265.5	2.7	24.0
Cb14G1S2oo	14.0	155	-	1107	-	-	369	858	-	-	2.1	120	665 \times 640	20.0	212.8	2.3	22.0
Cb16G1S2oo	16.0	160	-	1000	-	-	445	858	-	-	1.6	90	605 \times 605	12.8	93.8	2.3	22.0
Cb12G2S2oo	12.0	150	-	1250	-	-	218	-	914	-	3.4	210	655 \times 645	33.2	259.7	3.0	21.5
Cb14G2S2oo	14.0	155	-	1107	-	-	328	-	914	-	2.1	120	665 \times 660	14.6	200.0	2.2	21.5
Cb16G2S2oo	16.0	160	-	1000	-	-	403	-	914	-	1.5	90	565 \times 555	14.4	87.4	2.2	21.5
Cb12G1S2so	12.0	150	-	1250	-	-	260	858	-	2.0	3.0	240	665 \times 660	36.2	268.6	2.7	23.0
Cb16G1S2so	16.0	160	-	1000	-	-	445	858	-	2.0	1.5	90	635 \times 620	14.6	125.5	2.1	22.0
Cb12G1S2se	12.0	150	-	1230	20	-	260	858	-	1.0	3.4	240	645 \times 635	43.8	316.3	2.8	24.0
Cb16G1S2se	16.0	160	-	980	20	-	445	858	-	1.0	1.6	90	555 \times 550	21.7	87.1	2.6	23.0
Cb12G1S2oe	12.0	150	-	1210	40	-	260	858	-	-	4.1	240	560 \times 525	111.4	257.8	3.2	24.0
Cb16G1S2oe	16.0	160	-	960	40	-	445	858	-	-	2.0	90	645 \times 635	19.3	124.0	2.5	22.5

※この他、全調合に消泡剤 B \times 0.01% と樹脂繊維 0.1vol% を添加。

記した全ての水準で 20℃封緘養生とし、3ヶ月間の自己収縮を計測した。また、この水準とは別に、水結合材比や結合材種類のみを要因とした試験体を先行して製作し、自己収縮のほか、一部の調合について乾燥収縮を6ヶ月間計測した。自己収縮と乾燥収縮を対比した際の調合を表-4に示す。乾燥収縮試験体は、自己収縮試験体と同様に製作して凝結の始発からのひずみを連続計測し、材齢7日目にポリエステルフィルムによる被覆を除去して、以後は20℃60%の恒温恒湿室における気中養生とした。

3. 実験結果

3.1 製造およびフレッシュコンクリート試験結果

フレッシュコンクリートの試験結果から、水結合材比と高性能減水剤の所要添加率の関係を図-1に示す。練り上がりの状態を目視確認したところ、いずれの調合においても分離やこぼり等の異常は見られなかった。目標としたスランプフローを確保するためには、結合材種類をCaとした場合や膨張材を添加した場合では、結合材種類をCbで単独使用した場合よりも高性能減水剤の添加率を高くする必要があり、この傾向は水結合材比が小さくなるほど顕著になった。

水結合材比と50cmフロー時間の関係を図-2に示す。50cmフロー時間はいずれの調合でも10秒を超えた。フロー時間は水結合材比が小さいほど長くなり、水結合材比が12%で膨張材を添加した調合では100秒を超え、非常に高い粘性を示した。細骨材に砂岩砕砂S1を使用した調合では山砂S2に比べてフロー時間は10~20秒程度長くなった。結合材種類を比較すると、CaはCbよりも単位水量を10~15kg/m³少なく設定したが、フロー時間が同程度からやや短くなる傾向にあり、粘性を低減させて施工性を改善できることが確認できた。

3.2 凝結試験結果

水結合材比や使用結合材種類、混和材料の添加による凝結時間への影響を図-3に示す。凝結時間は、水結合材比や結合材種類によって、高性能減水剤の所要添加量が多くなるほど遅延する傾向にあった。混和材料の添加による影響は、無添加の調合と比べると、収縮低減剤は9~20時間遅延し、膨張材は2~9時間促進した。また、両者を併用した調合では2~3時間遅延した。

3.3 簡易断熱養生温度計測結果

簡易断熱養生供試体の材齢7日までの温度計測結果を図-4、5に示す。最高温度は、水結合材比が小さく単位結合材量の多い調合の方が低くなり、最高温度到達時間も水結合材比が小さい調合の方が遅れる傾向にあった。これは、水結合材比の小さな調合ほど高性能減水剤の添加量が多くなるため、初期の水和反応が遅延し、発熱に対する放熱の割合が高くなるために最高温度も低くなっ

たものと考えられる。また、結合材Caの最高温度は、同じ単位結合材量の調合でも結合材Cbよりも低かった。これは、前述の理由の他に結合材中のシリカフェュームの割合が多いことによると考えられる。

表-4 自己収縮・乾燥収縮対比用調合

記号	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)			
		W	B	S	G
Ca12G1S2	12.0	140	1167	297	896
Ca14G1S2	14.0	140	1000	441	896
Cb12G1S2	12.0	150	1250	223	896
Cb14G1S2	14.0	155	1107	331	896
Cb16G1S2	16.0	160	1000	408	896
Cb20G1S2	20.0	160	800	577	896

※乾燥収縮計測はCb14G1S2とCb20G1S2について実施

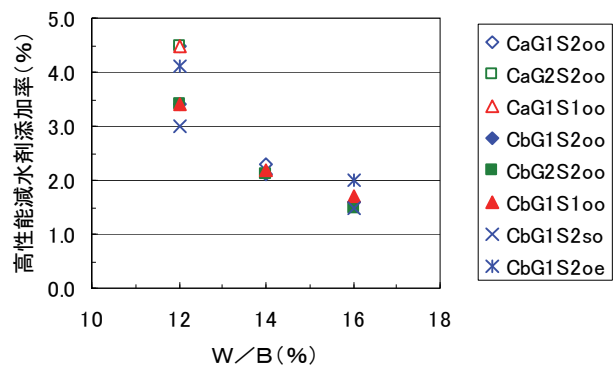


図-1 水結合材比と高性能減水剤の所要添加率の関係

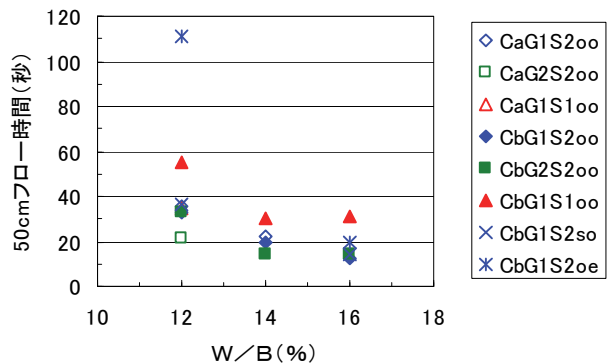


図-2 水結合材比と50cmフロー時間の関係

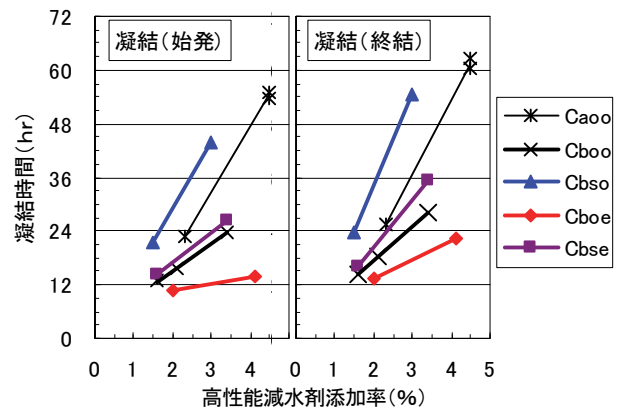


図-3 凝結試験結果

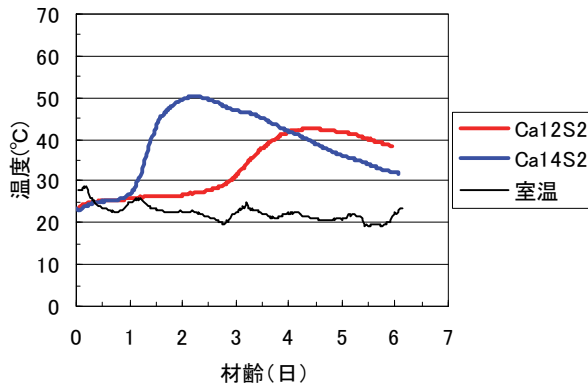


図-4 簡易断熱養生温度計測結果 (結合材:Ca)

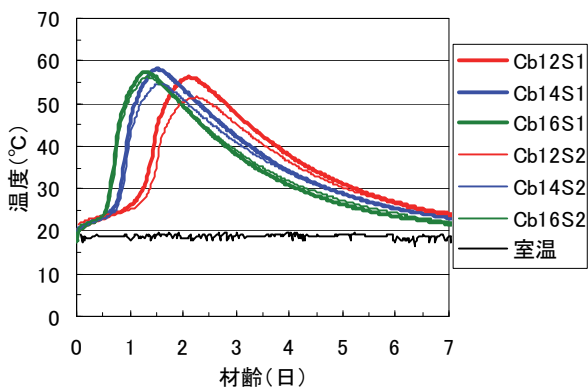


図-5 簡易断熱養生温度計測結果 (結合材:Cb)

3.4 強度試験結果

結合材や骨材の違いによる圧縮強度の比較を図-6に示す。本実験で用いた材料では、管理材齢 28 日における設計基準強度 150N/mm² の実現は難しいことが明らかになった。結合材種類による強度発現傾向は、初期材齢では異なるものの、長期にはほぼ同等であった。材齢 56 日の圧縮強度を比較すると、細骨材に砂岩砕砂 S1 を使用した調合は山砂 S2 を使用した調合に比べて、結合材を Ca とした場合では違いは見られなかったが、結合材を Cb とした場合では平均で 5%程度高くなった。また、粗骨材に石灰石砕石 G2 を使用した調合と硬質砂岩砕石 G1 を使用した調合では、圧縮強度に大きな差は見られなかった。

材齢 56 日の圧縮強度と結合材水比の関係を図-7に示す。結合材を Cb とした場合、細骨材を山砂 S2 とすると結合材水比 8.33 と 7.14 (水結合材比 12%と 14%) の間で圧縮強度の増分はほとんど無く、細骨材を砂岩砕砂 S1 としても、水結合材比を小さくすることによる圧縮強度の増加が頭打ちになる傾向が認められた。これに対して、結合材を Ca とした場合は、結合材水比 6.25 (水結合材比 16%) のデータは無いものの、この間の強度増加は Cb に比べて良好であった。

混和材料による圧縮強度への影響を図-8に示す。収縮低減剤を使用した調合の圧縮強度は、いずれの水結合材比においても初期の発現は小さく、無添加の調合に比

べて 17~22%低いが、長期的には増進して材齢 56 日で 4~7%程度、材齢 91 日では 4%程度の低下に収まった。膨張材を使用した調合の圧縮強度は、初期は無添加のものに比べて 2~3%の低下であったが、長期的には水結合材比によって異なり、水結合材比 16%の調合は同程度の強度低下率を維持したが、水結合材比 12%の調合は材齢 56 日で 10%、材齢 91 日では 8%低下した。この原因としては、膨張材が初期に水分と反応することで、水結合材比が小さい調合では、緻密な水和生成物の

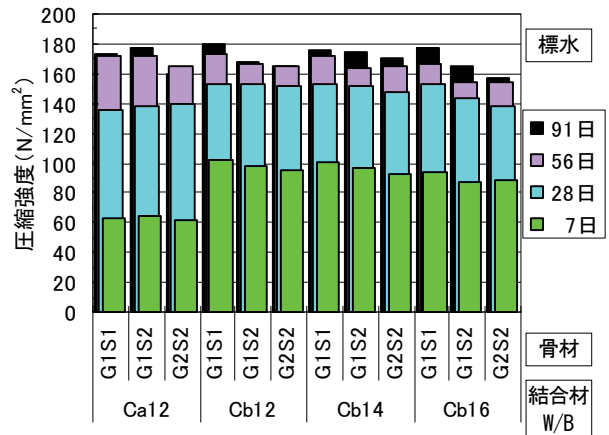


図-6 強度発現傾向 (結合材・骨材種類・W/B 別)

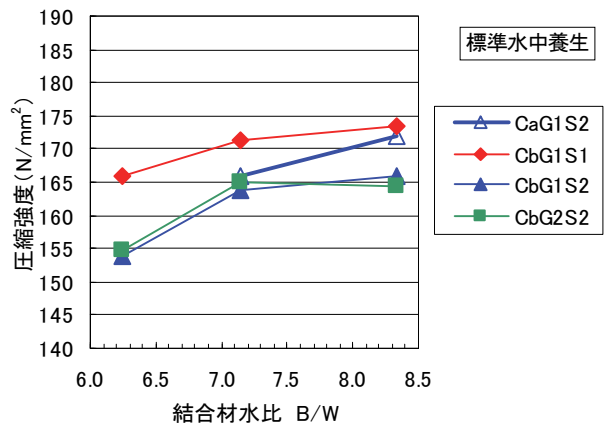


図-7 強度発現傾向 (材齢 56 日)

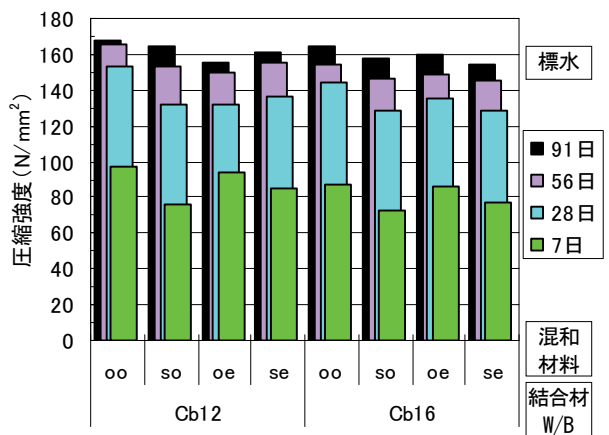


図-8 強度発現傾向 (混和材料別)

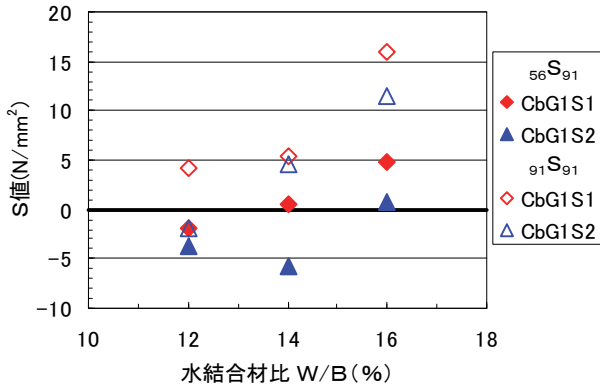


図-9 簡易断熱養生によるS値

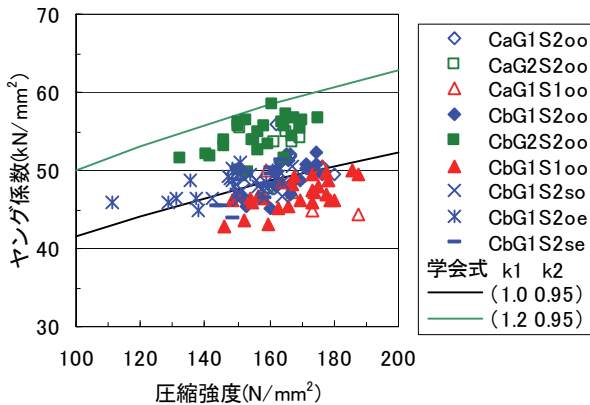


図-10 強度とヤング係数の関係

長期的形成が阻害されることや、長期の水和に必要な水分が十分に確保できなくなることが考えられる。

簡易断熱養生供試体による強度補正值 (S 値) を図-9 に示す。S 値は水結合材比が小さいほど小さくなり、水結合材比が 14% 以下の調査では ${}_{56}S_{91}$ の値はほぼ 0 となった。これは、いずれの結合材も低熱ポルトランドセメントをベースにして製造されているために、長期強度の伸びが良好であることによると考えられる。

圧縮強度とヤング係数の関係を図-10 に示す。圧縮強度とヤング係数の関係は、粗骨材を石灰石砕石 G2 にした調査では硬質砂岩砕石 G1 とした調査よりも高くなり、細骨材を砂岩砕砂 S1 にした調査では山砂 S2 にした調査よりもやや低くなる傾向が見られたが、使用した結合材種類や、収縮低減剤および膨張材の混和による影響は見られず、建築学会の関係式³⁾に添う結果であった。

3.5 収縮試験結果

自己収縮計測結果から、水結合材比や結合材種類による収縮傾向を図-11 に示す。自己収縮ひずみは、水結合材比が小さく単位結合材量が多い調査ほど大きくなる傾向にあった。材齢 180 日の自己収縮ひずみは、水結合材比が 12% では 800 μ を超えるが、14% 以上のものでは 700 μ を下回った。結合材種類を比較すると Ca は同じ水結合材比でも自己収縮ひずみは Cb よりも平均で 27% 小さく、水結合材比が 12% でも材齢 180 日で 600 μ を下回った。既往の研究⁴⁾では、シリカフュームの添加

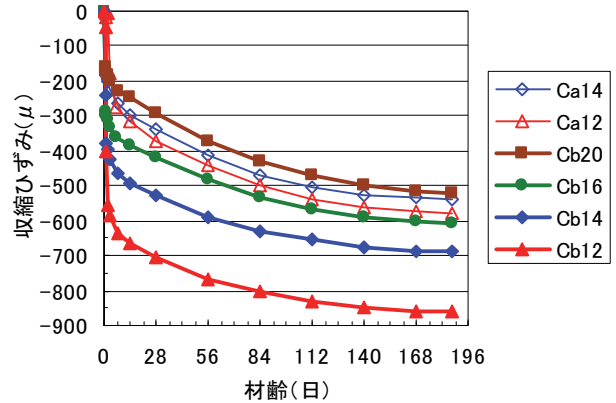


図-11 自己収縮計測結果 (結合材種類・W/B 別)

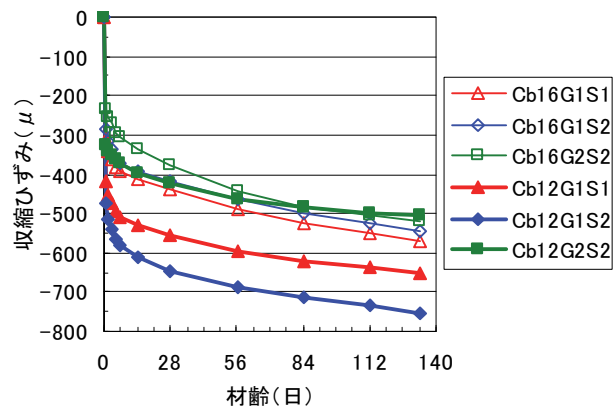


図-12 自己収縮計測結果 (骨材種類別)

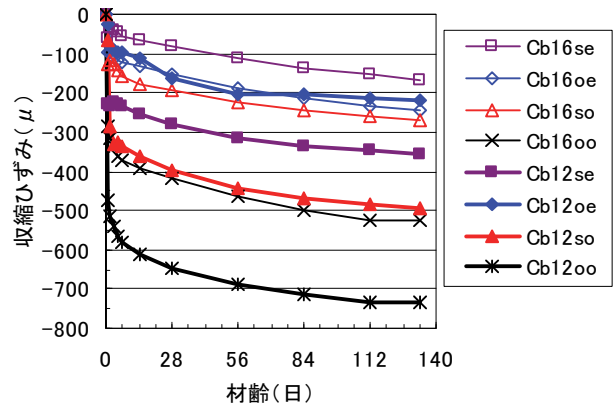


図-13 自己収縮計測結果 (混和材料別)

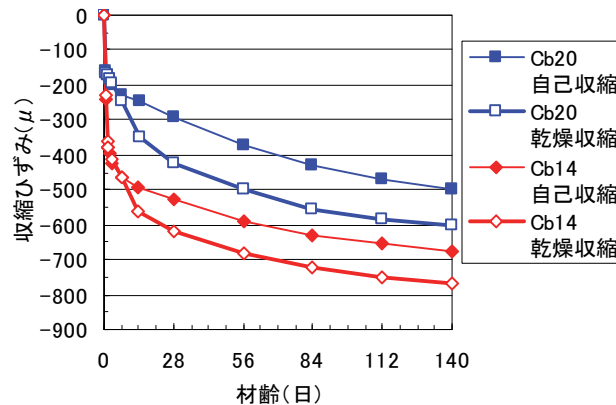


図-14 自己収縮と乾燥収縮の計測結果対比

率が多い場合には自己収縮量が増えることが報告されているが、今回の実験では、結合材を Ca とした調査では、結合材を Cb とした同じ単位結合材量の調査と比較しても自己収縮が小さいため、Ca は Cb に比べて自己収縮の抑制に適した結合材であると考えられる。

水結合材比や骨材種類による収縮傾向を図-12 に示す。粗骨材を石灰石砕石 G2 とした場合は硬質砂岩砕石 G1 に比べて、水結合材比 12%の調査で 34%、水結合材比 16%では 13%収縮量が小さくなった。細骨材種類を比較した場合は、砂岩砕砂 S1 と山砂 S2 の間で収縮に明確な差は見られなかった。

混和材料を添加した場合の自己収縮ひずみの計測結果の比較を図-13 に示す。混和材料による自己収縮ひずみの低減効果は水結合材比によって若干異なるが、平均すると収縮低減剤が 43%、膨張材が 63%、これらを各半量併用した調査では 62%であった。

収縮計測結果を図-14 に示す。乾燥収縮量は、脱型した材齢 7 日から材齢 28 日まででは自己収縮量との差が大きくなっていったが、その後は自己収縮と同様の収縮傾向を示しており、乾燥収縮は自己収縮に比べて最大でも 130 μ 程度大きいだけであった。

4. まとめ

室内試験練りと凝結試験、温度計測、圧縮強度試験、収縮計測などの結果から、以下のことが明らかとなった。

- a. フレッシュコンクリート～硬化性状
 - i. フレッシュコンクリートの粘性は、細骨材を砂岩砕砂とした調査や膨張材を添加した調査では高くなり、結合材種類を Cb とした調査は Ca に比べて高くなった
 - ii. 凝結時間は、水結合材比 12%では 24～48 時間以上を要し、結合材種類を Ca とした調査や収縮低減剤の添加により遅延し、膨張材の添加により促進した
 - iii. 硬化時の最高温度は、高性能減水剤の添加量の影響により、水結合材比の小さいものほど低く、その到達時間は遅れる傾向にあった
- b. 圧縮強度性状
 - i. 適切な材料を選択した上、水結合材比を 14%以下にすることで、材齢 56 日以降に設計基準強度 150N/mm²を満足するコンクリートが製造できる
 - ii. 圧縮強度は、結合材種類を Ca とした調査では材齢 28 日まででは結合材種類を Cb とした調査よりも低い、長期強度はほぼ同等であった
 - iii. 圧縮強度は、粗骨材に石灰石砕石を使用した調査と硬質砂岩砕石を使用した調査では差は無かったが、細骨材に砂岩砕砂を使用した調査では山砂よりも 5%程度高くなった

- iv. 長期圧縮強度は、混和材料の添加によって収縮低減剤では 4%、膨張材は 8%程度低下した
- v. S 値は水結合材比が小さいほど小さくなり、水結合材比 14%以下で S_{91} の値は 0 となった
- vi. 圧縮強度とヤング係数の関係は、建築学会の関係式にはば添う結果であった

c. 収縮性状

- i. 自己収縮ひずみは、水結合材比が小さくなるほど大きくなるが、普通強度のコンクリートの乾燥収縮量と同程度であった
- ii. 結合材種類を Ca とした調査は Cb とした調査よりも自己収縮ひずみが小さくなった
- iii. 自己収縮ひずみは、粗骨材を石灰石砕石とした調査では硬質砂岩砕石に比べて小さくなった
- iv. 水結合材比や使用材料により異なるが、混和材料によって自己収縮ひずみは 35%以上低減された
- v. 乾燥収縮は自己収縮に比べて 130 μ 程度大きい

5. あとがき

Fc150N/mm² 級の高強度コンクリートの実用化に向けて、結合材や骨材の種類、混和材料などを要因に水結合材比 16～12%の調査について室内試験練りを行った。この結果、コンクリートの練り混ぜが可能であることと、骨材種類、混和材料による圧縮強度発現傾向や自己収縮の傾向などを把握することができ、Fc150N/mm² に対応した材料や調査についての基礎的性状に関する資料をまとめた。実験から、現在使用できる材料のなかで高強度コンクリートに対応した良質なものをを用いても、水結合材比と強度の関係に頭打ちの傾向があることなどから、Fc150N/mm² のコンクリート製造は、レディミクストコンクリート工場の通常のラインで製造できるほぼ限界の強度域であると考えられる。

今後はこれらの資料をもとに、生コン工場での製造実験などを経て Fc150N/mm² 級の高強度コンクリートの実用化に取り組んでいく予定である。

【参考文献】

- 1) 例えば、谷川恭雄ほか、「高強度・超高強度コンクリートの圧縮破壊性状に及ぼす粗骨材品質の影響」、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 13、No. 1、pp. 209-214、1991、など
- 2) 日本コンクリート工学協会、「コンクリートの自己収縮研究委員会報告書」、2002
- 3) 日本建築学会、「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」、p. 38、1999
- 4) 今本啓一ほか、「高強度・超高強度コンクリートの収縮性状に関する研究」、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 17、No. 1、pp. 1061-1066、1995