論文　200N/mm^{2}級超高強度コンクリートの実用化に関する研究

河上　浩司[*1]・小出　貴夫[*2]・西本　好克[*3]・鈴木　康範[*4]

要旨：200N/mm^{2}級超高強度コンクリートの実用化を目指し選定した材料を用いて，試験練りミキサおよび実機ミキサにてコンクリートを練り混ぜ，フレッシュ性状の確認とともに，標準水中養生と加熱養生を行った供試体および模擬試験体より採取したコア供試体の強度確認を実施した。その結果，実機ミキサでの製造が可能であることや，練上がり後３時間まで安定したフレッシュ性状を保持できることを確認した。一方，圧縮強度については加熱養生供試体とコア供試体において 200N/mm^2 を超える強度を得ることができた。さらに，強度管理手法として加熱養生供試体による管理の有効性を示した。

キーワード：超高強度コンクリート，構造体コンクリート，圧縮強度，フレッシュ性状，強度管理

1. はじめに

近年，集合住宅をはじめとする超高層建築物へ適用されるコンクリートは高強度化が進んでおり，すでに設計基準強度（以下，Fc と称す）として 150N/mm^2 までの高強度コンクリートが実用化されている [1)]。また，研究対象は，更に強度の高い 200N/mm^2 級超高強度コンクリートも対象となりつつある [2),3)]。

150N/mm^2 を超える超高強度コンクリートを実用化するにあたり，使用材料や製造方法および強度発現性状の解明などの課題が考えられる。このうち，筆者らも使用材料について検討を行い，ジルコニア起源シリカ質微粉末やフェロニッケルスラグ細骨材および硬質砂岩砕石を用いて，200N/mm^2 以上の強度が得られるコンクリートを製造できたことを既報 [4)]にて報告している。一方，強度発現性状として，150N/mm^2 を超える超高強度コンクリートでは，構造体に打ち込まれたコンクリートが初期高温履歴を受けた場合，その温度条件によっては標準養生供試体では到達できない強度が発現し，標準養生による強度管理では不合理となることから，加熱養生について検討を行った報告もなされている [5)]。したがって，200N/mm^{2}級超高強度コンクリートの実用化に向けては，実機プラントでの製造性検証やフレッシュ性状の確認，供試体あるいは構造体コンクリートでの強度確認，各種物性の確認および強度管理手法の確立が必要である。

ここでは，室内試験に加え実機プラントでの製造実験，模擬試験体による構造体コンクリートの強度確認および強度管理手法の検討を行った結果を報告する。

2. 確認実験

実験は，室内試験と実機試験とを行った。室内試験は実機試験に先立ち，主にフレッシュ性状および各種養生条件における水結合材比と強度との関係を確認した。実機試験では製造性検証や経時変化の確認，供試体の強度発現と模擬試験体における温度履歴と強度発現の確認を実施した。

2.1 共通事項

(1) コンクリート

コンクリートの使用材料を**表－１**に示す。結合材（B）は過去に筆者らが行った検討 [4),6)] をもとに，低熱ポルトランドセメント（以下，LC）とジルコニア起源シリカ質微粉末（以下，ZSF）を主材料とした。ただし，ジルコニア起源シリカ質微粉末を大量使用することによる凝結遅延対策 [6)]として，一部を早強ポルトランドセメント（以下，HC）で置換した。細骨材はフェロニッケルスラグ細骨材を，粗骨材は茨城県桜川産硬質砂岩砕石（６号）を使用した。化学混和剤はポリカルボン酸系の高性能減

表－１　使用材料

		種類	記号		物性
結合材	セメント	低熱ポルトランドセメント	LC	B	密度：3.24g/cm^3，比表面積：3300cm^2/g，C_2S：55%
		早強ポルトランドセメント	HC		密度：3.13g/cm^3，比表面積：4550cm^2/g，C_3S：66%
	混和材	ジルコニア起源シリカ質微粉末	ZSF		密度：2.25g/cm^3，比表面積：10.2m^2/g，SiO_2：96.0%
細骨材		フェロニッケルスラグ	S		密度：2.96g/cm^3，吸水率：0.76%，F.M.：2.2
粗骨材		硬質砂岩砕石（6号）	G		密度：2.65g/cm^3，吸水率：0.84%，実積率：58.5%，最大寸法：13mm
化学混和剤		高性能減水剤	SP		ポリカルボン酸系

*1 三井住友建設（株）建築技術部　博士（工学）（正会員）
*2 住友大阪セメント（株）セメント・コンクリート研究所　（正会員)
*3 三井住友建設（株）技術開発センター　（正会員）
*4 住友大阪セメント（株）セメント・コンクリート研究所　工博（正会員)

水剤を使用した。

コンクリートの調合を**表－２**に示す。室内試験の水結合材比（記号，W/B）の範囲は 14%～18%の間で３水準とし，実機試験の範囲は 13%を加えた４水準とした。結合材中の LC と HC および ZSF の構成比は，質量比で 7:1:2 とした。単位水量は 150kg/m^3 に，単位粗骨材量は 848kg/m^3 に統一した。目標スランプフロー値は W/B に応じて設定し，高性能減水剤の使用量にて調整した。目標空気量は全て 1.5±1.0%とした。

(2) 確認項目と試験体

室内試験および実機試験における確認項目を**表－３**に示す。フレッシュ性状として，スランプフロー試験と空気量試験およびコンクリート温度の確認を行った。供試体の養生方法は，標準養生と加熱養生の二通りとした。なお，加熱養生とは封かん状態で材齢２日より７日まで 70℃の温度環境下で養生する方法である。

模擬試験体として，**図－１**に示す 1.0×1.0×1.0m 角ブロックの上下に断熱材を施した模擬柱試験体と，**図－２**に示すような内寸が 500×500×400mm で，周囲６面を断熱材で覆った小型試験体を用意した。室内試験では小型試験体のみを製作し，実機試験では模擬柱試験体と小型試験体の両方を製作した。試験体の温度履歴は，図中に示す位置に熱電対を設置し 30 分間隔で測定した。

2.2 室内試験

室内試験は 2008 年５月下旬に実施した。コンクリートの練混ぜは，容量 100L の強制二軸練りミキサを使用してモルタル先練り方式で行い，モルタル練り時間と本練り時間は性状をみて調整した。なお，三種類の結合材は水投入前の空練り時にミキサにて混合した。

2.3 実機試験

実機試験は 2008 年７月下旬に実施した。コンクリートの練混ぜは容量 3.0m^3 の強制二軸練りミキサを用い，室内試験と同様にモルタル先練り方式で行った。なお，三種類の結合材は練混ぜ時にミキサでの混合とはせず，事前にプレミックス工場に搬入し，プロシェアミキサでプレミックスしたものを使用した。

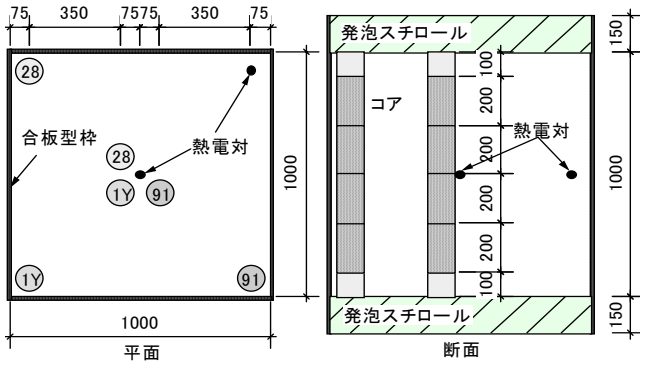
実機試験の手順を**図－３**に示す。バッチあたりのコンクリート練混ぜ量は，結合材の計量器の最大秤量とミキサの能力に余裕を持たせるため 1.0～1.5m^3 とし，２ないし３バッチを混合して実験に供した。なお，経時変化を確認するための基準時刻（経時０分）は最終バッチの排出時刻とした。経時変化は W/B18 では２時間後まで，

表－２　コンクリート調合

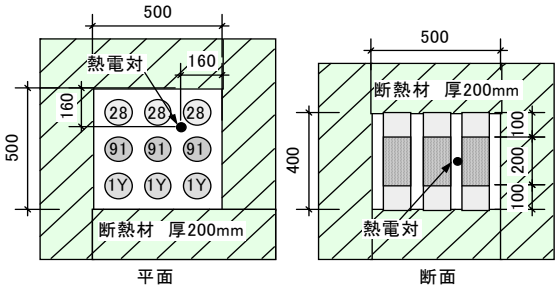
記号	W/B (%)	B/W	目標ﾌﾛｰ (cm)	結合材比率(%) LC	HC	ZSF	g/glim (m^3/m^3)	s/a (%)	Air (%)	単位量(kg/m^3) W	LC	HC	ZSF	S	G
W/B13	13.0	7.69	75±10	70	10	20	0.547	25.8	1.5±1.0	150	808	115	231	373	848
W/B14	14.0	7.14	75±10	70	10	20	0.547	32.5	1.5±1.0	150	750	107	214	456	848
W/B16	16.0	6.25	70±10	70	10	20	0.547	38.4	1.5±1.0	150	656	94	188	590	848
W/B18	18.0	5.56	70±10	70	10	20	0.547	42.3	1.5±1.0	150	583	83	167	693	848

表－３　確認事項

		室内試験	実機試験
フレッシュ性状	スランプフロー	練上がり直後	経時変化を確認
	フロー時間		
	空気量		
	コンクリート温度		
供試体	標準養生	材齢7,28,91日	材齢7,28,56,91日,1年
	加熱養生	材齢7,28日	材齢7,28日
模擬柱試験体	温度履歴	―	中心部，端部
	圧縮強度	―	中心部，端部で材齢28,91日,1年
小型試験体	温度履歴	中心部	中心部
	圧縮強度	材齢28,91日,1年	材齢28,91日,1年



図－１　模擬柱試験体



図－２　小型試験体

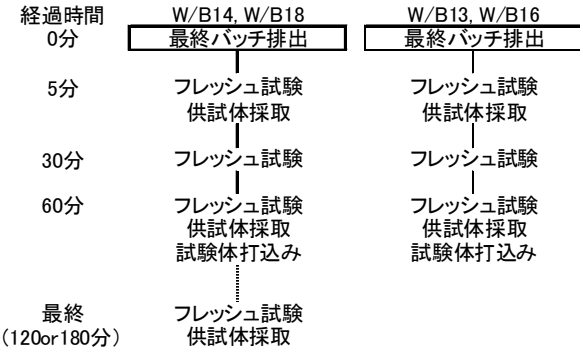
W/B14 では 3 時間後まで，W/B13 と W/B16 は 1 時間後まで 30 分間隔を原則に確認した。テストピースの採取は，練上がり直後と経時 60 分を基本とし，W/B14 と W/B18 では経時変化の最終確認時にも採取した。ただし，W/B18 では経時 60 分のスランプフロー値が目標値上限に近かったので，経時 90 分にて採取した。模擬試験体への打込みは，経時 60 分（W/B18 では 90 分）にて行った。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

フレッシュ試験の結果の例を**表－4** に示す。室内試験は練上がり時の結果を，実機試験は経時 60 分（W/B18 は 90 分）での結果を示している。全体的にスランプフローは大きく，一部では目標範囲をわずかに超えたが，分離と判断される状態ではなかったので試験に用いた。空気量は目標範囲内にあるが全体的に小さく，室内試験では 1.0%未満の結果もみられた。なお，全試験結果について 2.0%を超えることはなかった。

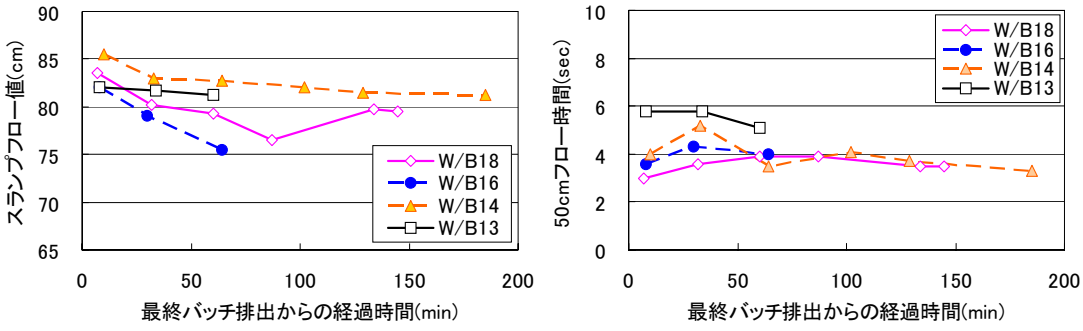
実機試験でのフレッシュ性状の経時変化を**図－4** に示す。夏期試験であったため，時間の経過とともにフローロスしていくと予想されたことから練上がり時のスランプフロー値は高めに設定した。しかし，実際には時



図－3　実機試験手順

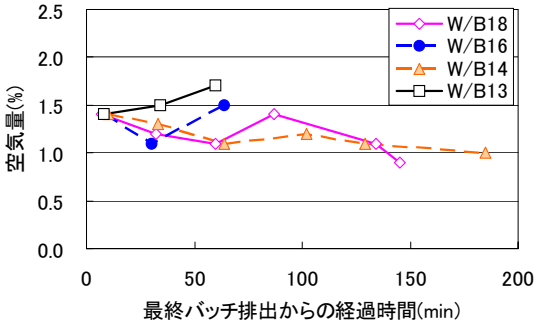
表－4　フレッシュ性状

		記号	SP使用量 (B*%)	フロー時間(sec) 50cm	フロー時間(sec) 停止	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度(℃)	外気温 (℃)	単位容積質量 (ton/m³)
室内試験	1	W/B14	1.9	5.8	＞180	78.0	1.5	25.5	22.1	2.52
	2	W/B16	1.7	4.3	＞180	77.5	0.9	25.5	22.0	2.53
	3	W/B18	1.1	3.9	＞180	80.5	0.7	24.5	22.6	2.54
実機試験	1	W/B13	1.9	5.1	＞180	81.5	1.7	33.0	33.9	2.51
	2	W/B14	2.0	3.5	114	83.0	1.1	29.0	32.7	2.52
	3	W/B16	1.0	4.0	114	75.5	1.5	32.0	31.2	2.51
	4	W/B18	1.1	3.9	102	76.5	1.4	32.0	32.9	2.51

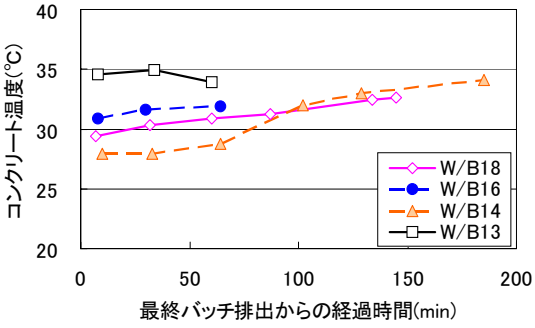


(a) スランプフロー値

(b) 50cm フロー時間



(c) 空気量



(d) コンクリート温度

図－4　フレッシュ性状の経時変化

間経過に伴うフローロスは小さく，W/B14 では練上がり後３時間までフレッシュ性状を保持できた。W/B16 ではフローロスが若干大きいが，W/B16 は最後に練り混ぜた調合で，試験当日の傾向を踏まえ高性能減水剤使用量を少なくしたためである。50cm フロー時間は試験時間内ではほとんど変化せず，W/B13 では６秒弱，そのほかでは４秒程度となった。空気量は，W/B13 では増加傾向にあるものの概ね安定していた。

3.2 温度履歴

模擬試験体の温度履歴の例として，実機試験の W/B14 の結果を**図－５**に示す。模擬柱試験体のコンクリート温度は，材齢７日頃までに中心部と端部とも外気温近くまで降下したが，小型試験体では降下するまでに材齢 20 日近くまでかかった。

温度測定結果の一覧を**表－５**に示す。小型試験体は，室内試験と実機試験で製作時期が２ヶ月ほど異なるが温度上昇量は概ね一致した。小型試験体では厚さ 200mm の断熱材で覆っているため，外気温の影響を受けにくいことが理由と考えられる。また，模擬柱中心部と小型試験体をみると，最高温度とその到達時間はほぼ同じであった。

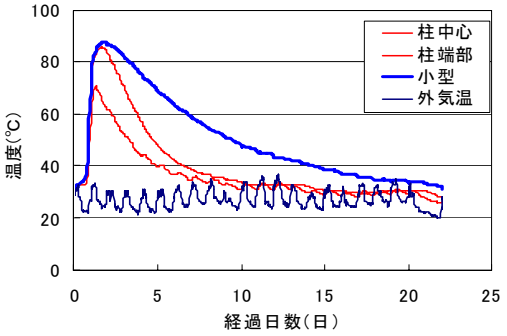
3.3 圧縮強度発現

実機試験における経時 60 分採取供試体と，その他の時間に採取した供試体の圧縮強度比較結果を**図－６**に示す。経時 60 分で採取した供試体と練上がり直後ないし試験最後に採取した供試体の圧縮強度は，養生や試験材齢にかかわらずほぼ 1：1 の関係にあり，採取時期の影響はみられなかった。以降，実機試験における供試体の圧縮強度は，模擬試験体の打込みを行った経時 60 分ないし 90 分に採取した供試体で検討する。

各種供試体の圧縮強度試験結果を**図－７**に示す。なお，図中には筆者らが過去に報告[7]した Fc150N/mm^2 級に対応する結合材（低熱ポルトランドセメントの質量比 10%を金属シリコン起源シリカフュームにて置換）の結果（回帰線）を併せて示している。

標準養生をみると，白抜で示している室内試験の圧縮強度は，材齢７日では実機試験よりも低いが，最終的には実機試験に比べ高くなる傾向となった。これは，供試体採取時のコンクリート温度と空気量の違いが要因と考えられる。標準水中養生では圧縮強度は材齢とともに増加していく傾向がみられたが，長期材齢において 200N/mm^2 手前で横ばいとなった。一方，加熱養生では材齢７日以降 28 日までの強度増加はほとんどないが，結合材水比との比例関係を維持し 200N/mm^2 を上回る圧縮強度が得られた。

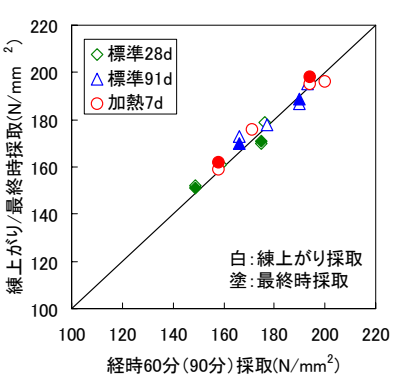
今回開発した超高強度コンクリートの圧縮強度は，全



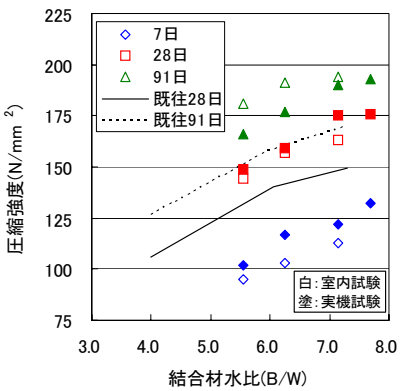
図－５　温度履歴の一例（実機試験　W/B14%）

表－５　温度測定結果

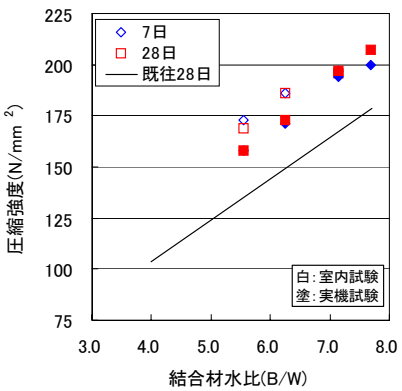
	W/B	模擬柱試験体（上段:中心／下段:端部） 最高温度(℃)	上昇量(℃)	到達時間(h)	小型試験体 最高温度(℃)	上昇量(℃)	到達時間(h)
室内試験	14%	—	—	—	79.0	56.6	49.8
	16%	—	—	—	76.8	54.3	49.6
	18%	—	—	—	73.8	51.3	42.7
実機試験	13%	88.6	55.1	35.8	90.6	56.7	38.8
		74.3	40.8	28.3			
	14%	85.5	53.8	40.3	87.5	55.8	40.3
		70.5	38.8	30.8			
	16%	83.0	50.5	25.5	84.8	52.7	32.5
		66.5	34.0	22.0			
	18%	79.7	47.4	32.0	80.4	47.8	36.5
		66.9	34.6	25.0			



図－６　採取時期と圧縮強度



(a) 標準養生



(b) 加熱養生

図－７　供試体の圧縮強度[7]

体的に Fc150N/mm^2 級のコンクリート [7]と比べて，同一結合材水比において 20N/mm^2 程度高い。これは，ZSF の分散性が優れていることや細骨材の強度が高いこと，粗骨材を最大寸法が 13mm と小さい 6 号砕石とすることで脆弱部が減少していることなどが考えられる。今後は，内部組織や水和生成物からの確認も行う必要がある。

模擬試験体より採取したコア供試体の圧縮強度試験結果を，室内試験結果については Fc150 N/mm^2 級コンクリートで製作した小型試験体の回帰線 [7]とともに**図－８**に，実機試験結果については模擬柱試験体の回帰線 [7]とともに**図－９**に示す。

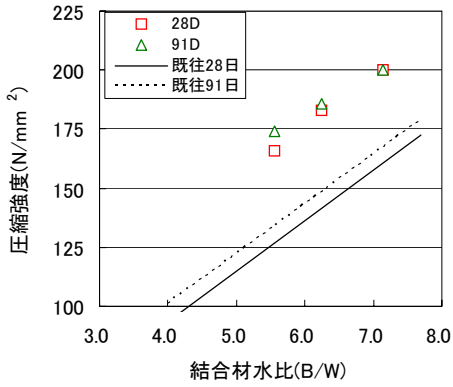
今回，W/B13 の模擬柱中心および小型試験体より採取したコア，および W/B14 の小型試験体より採取したコアの一部で 200N/mm^2 以上の圧縮強度が得られた。最高強度は室内試験と実機試験でほぼ一致したが，コアについても室内試験のほうが同一水結合材比に対してわずかに高強度となる傾向があった。実機試験において模擬柱中心部と小型試験体の圧縮強度はほぼ等しく，全体的に材齢 28 日から 91 日までの強度の増加量は小さかった。一方，模擬柱試験体の端部の圧縮強度をみると，材齢 28 日強度は，模擬柱中心や小型試験体に比べ低い。 W/B18 や W/B 16 では材齢 28 日から 91 日までに増加する傾向がみられ，模擬柱中心部や小型試験体の強度に近づいたが，W/B14 や W/B 13 では圧縮強度の増進が小さく，模擬柱内では強度が不均一な状況が続いており，品質や強度管理の観点から好ましくない。この原因として，模擬柱端部では，**図－５**に示したように最高温度が 70℃を超えても高温の保持時間が短いという，温度履歴が影響していると考えられる。

今回の結果からは，200N/mm^2 級超高強度コンクリートを実現するためには，夏期施工であっても型枠面に断熱材を施すなどの方策をとり，高温の保持時間を確保して高強度化を図る必要があると考えられた。また，断熱材の採用は部材内部での温度履歴の差も小さくなるため，部材内強度差の解消にも繋がると考えられる。

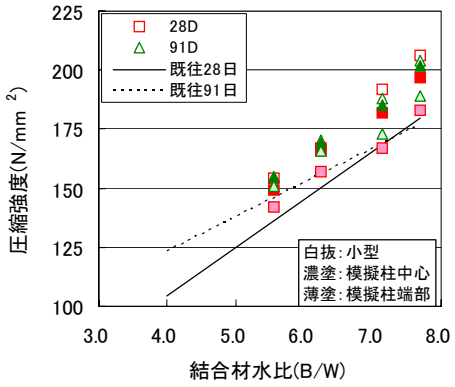
4. 強度管理手法の検討

4.1 標準養生

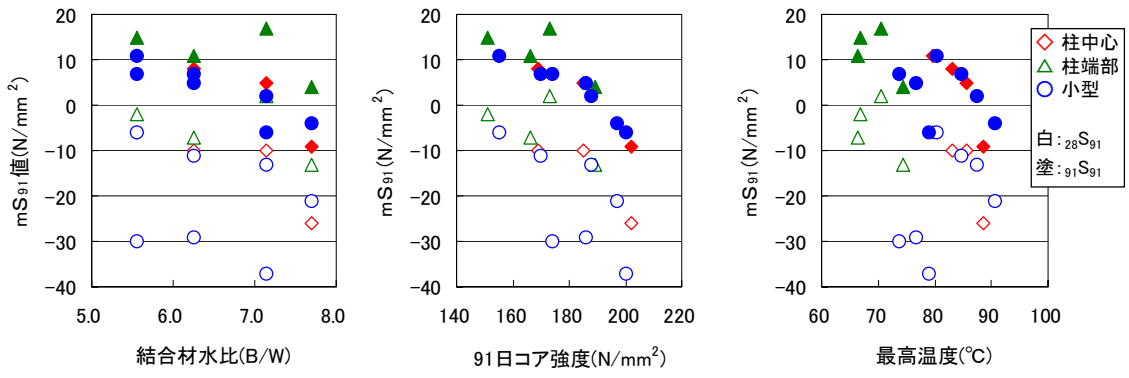
標準養生 m 日（28 日ないし 91 日）強度とコア 91 日強度の差（mS_{91} 値）を，結合材水比と 91 日コア強度ならびに最高温度で整理した結果を**図－10** に示す。既往の報告 [7]で発表したように，結合材水比の増加（強度の増加）や部材最高温度の上昇に伴い mS_{91} 値は低下する傾向が確認された。$_{28}S_{91}$ 値はそのほとんどが，$_{91}S_{91}$ 値でもいくつかが負の値となった。ここで，JASS5 では mS_{91} 値に負の値が認められていないことから，管理用供試体にて



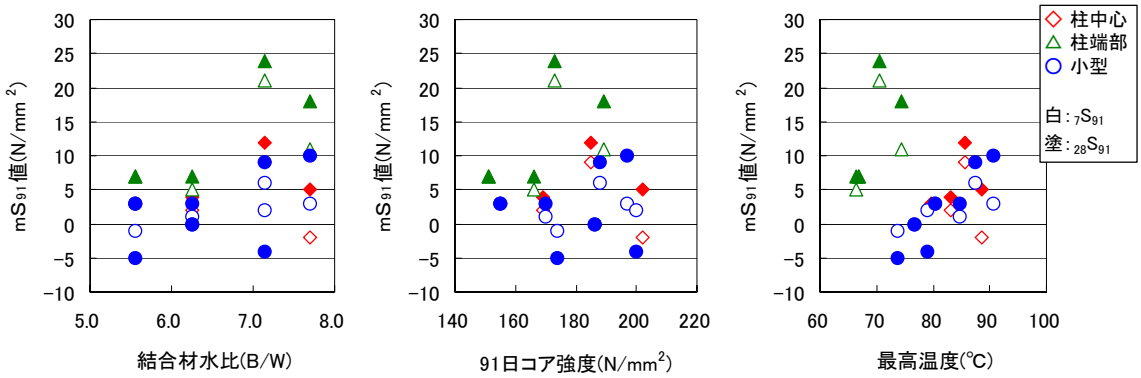
図－８　構造体コンクリート強度（室内試験）



図－９　構造体コンクリート強度（実機試験）



図－10　標準養生による mS_{91} 値算出結果



図－11　加熱養生による mS_{91} 値算出結果

構造体コンクリートの所要強度を保証する必要があり，そのためには水結合材比を低減させる必要が生じる。標準養生供試体により構造体コンクリート強度の管理を行うには，不合理が生じると考えられる。

4.2 加熱養生

加熱養生m日（7日ないし28日）とコア91日強度との差（mS_{91} 値）を，結合材水比と91日コア強度ならびに最高温度で整理した結果を**図－11**に示す。加熱養生との関係で整理すると，m日をどちらに設定しても mS_{91} 値は多くが正の値となり，その分布範囲は0～12N/mm^{2}程度となった。模擬柱端部では一部極端に大きい値もあるが，断熱材などの使用により是正は可能と考えられる。ここで，mS_{91} 値が正の値となるということは，管理用供試体強度が構造体コンクリート強度を上回ることを示している。管理用供試体での強度保証のために水結合材比を低減させる必要はないことから，今回実施した加熱養生の方法にて，標準養生よりも合理的な強度管理が可能であることを示唆している。

5. まとめ

200N/mm^{2}級超高強度コンクリートの実用化に向けて室内試験および実機試験にて各種性状の確認を行った。得られた知見を以下に示す。

(1) 本研究において開発した200N/mm^{2}級超高強度コンクリートは，練上がりから3時間後まで良好なフレッシュ性状を保持することができた。

(2) 材齢91日までの範囲において得られた最高強度は，標準養生では194N/mm^{2}であるのに対し，高温履歴を受けた加熱養生や模擬試験体より採取したコア供試体では200N/mm^{2}を超えた。

(3) 大型の部材では中心部と表面部で温度履歴が異なり，結果として強度差が生じることを確認した。

(4) 200N/mm^{2}級の超高強度コンクリートは，標準養生での強度管理よりも加熱養生での強度管理が合理的であることを示唆した。

謝辞

本実験の実施にあたり多大なご協力をいただきました日本シーカ㈱，佐倉エスオーシー㈱佐倉工場の関係各位に謝意を表します。

参考文献

1) 飯島眞人，渡邉悟士ほか：設計基準強度150N/mm^{2}の低収縮型超高強度コンクリートの適用および品質管理結果，その1，その2，日本建築学会学術講演梗概集，A-1，pp.37-40，2007.8

2) 小島正明，辻大二郎，三井健郎ほか：Fc200N/mm^{2}超高性能コンクリートの開発，（その1）フレッシュコンクリートおよび圧縮強度の発現性状，（その2）自己収縮およびその他の力学特性，（その3）補強用鋼繊維の発錆特性，日本建築学会学術講演梗概集，A-1，pp.1087-1092，2008.9

3) 渡邉悟士ほか，設計基準強度200N/mm^{2}の超高強度コンクリートの開発に関する検討，日本建築学会学術講演梗概集，A-1，pp.1077-1078，2008.9

4) 小出貴夫ほか：200N/mm^{2}級超高強度コンクリートにおける使用材料が強度特性に及ぼす影響の検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.30，No.2，pp.61-66，2008.7

5) 例えば小泉信一ほか：超高強度コンクリートの潜在的な強度発現性および水和反応に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.30，No.2，pp.115-120，2008.7

6) 河上浩司ほか：シリカ質微粉末を用いた超高強度モルタルの物性に関する一検討，第62回セメント技術大会講演要旨，pp.164-165，2008.5

7) 河上浩司ほか：150N/mm^{2}級超高強度コンクリートの強度発現に関する実験研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1235-1240，2006.7