

論文 コンクリートの圧縮強度に及ぼす脱型時期と養生条件の影響

井上 祐二^{*1}・水越 睦視^{*2}・喜多 茂^{*3}・吉川 俊彦^{*4}

要旨: 本研究では、標準期、夏期、冬期において養生条件を変化させた実機試験を行い、脱型時期と養生条件がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響について検討した。その結果、20℃水中養生（標準養生）強度は脱型時期が遅くなるに伴い低下する傾向にあり、この傾向は夏期において顕著であることがわかった。また、水中養生強度は、養生温度に関わらず、標準養生強度と積算温度の関係式から推定できるが、封緘養生強度はこの関係式からは推定できないこと、標準養生供試体と20℃封緘養生供試体の細孔構造には違いがあることが示された。

キーワード: 圧縮強度、脱型時期、養生条件、積算温度、細孔構造

1. はじめに

コンクリートの圧縮強度は、打設時期や脱型時期、養生条件の影響を受けることが経験的に知られており、これらに関する研究も報告されている¹⁾²⁾。しかしながら、これらの影響要因と実機で製造されたコンクリートの圧縮強度の関係を検討したデータは十分とはいえない。これらの関係が明確になれば、レディーミクストコンクリート製造者の強度管理、施工者の構造体コンクリート強度の管理にも有効に活用することができる。

本研究では、標準期、夏期、冬期において脱型時期と養生条件を変化させた実機試験を行い、各種養生条件がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響について検討した。強度管理については、積算温度と20℃水中養生（標

準養生）供試体の圧縮強度の関係式を用いて、20℃以外の養生温度や封緘で養生した場合の強度が推定可能かどうかについて検討した。また、水中養生と封緘養生、さらに混和材にフライアッシュを用いた場合の細孔構造の違いを検討するために細孔径分布の測定も実施した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

実験に使用したコンクリートの使用材料を表-1に、示方配合を表-2に示す。なお、A工場の混和剤は夏期のみ遅延形を使用した。実験に用いたレディーミクストコンクリートは、四国地方の出荷状況から普通コンクリートとし、配合は建築用として30-18-20N、土木用とし

表-1 使用材料

出荷工場	材料名	種類	製造業者、または産地等	概要
A	セメント	普通ポルトランドセメント	A社製	密度：3.16g/cm ³ ，比表面積：3350cm ² /g
		高炉セメントB種	A社製	密度：3.04g/cm ³ ，比表面積：3760cm ² /g
	水	地下水，上澄水	高松市	—
	細骨材	砕砂(石灰石)	大分県津久見市	表乾密度：2.68g/cm ³ ，粗粒率：2.80，混合比率70%
		海砂①	佐賀県唐津市	表乾密度：2.54g/cm ³ ，粗粒率：2.00，混合比率30%
	粗骨材	砕石2005(石灰石)	大分県津久見市	表乾密度：2.70g/cm ³ ，粗粒率：6.60，混合比率100%
混和剤	AE減水剤標準形I種	B社製	リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体	
T	セメント	普通ポルトランドセメント	T社製	密度：3.16g/cm ³ ，比表面積：3190cm ² /g
		高炉セメントB種	T社製	密度：3.04g/cm ³ ，比表面積：3730cm ² /g
	水	上澄水，上水道水	高松市	—
	細骨材	海砂②	佐賀県唐津市	表乾密度：2.58g/cm ³ ，粗粒率：2.40，混合比率50%
		海砂③	佐賀県唐津市	表乾密度：2.56g/cm ³ ，粗粒率：3.00，混合比率50%
	粗骨材	砕石1505(流紋岩)	兵庫県姫路市家島町	表乾密度：2.60g/cm ³ ，実積率：59.0%，混合比率50%
		砕石2010(流紋岩)	兵庫県姫路市家島町	表乾密度：2.60g/cm ³ ，実積率：59.0%，混合比率50%
	混和剤	AE減水剤標準形I種	F社製	リグニンスルホン酸塩とオキシカルボン酸塩の複合体
混和材	フライアッシュ(JISII種)	S社製	密度：2.25g/cm ³ ，比表面積：3870cm ² /g	

*1 中讃協業生コン（株） 工場長（正会員）

*2 香川高等専門学校 建設環境工学科 博（工）（正会員）

*3 住友大阪セメント（株） 四国支店 技術センター長（正会員）

*4 BASFジャパン（株） 建設化学品事業部 プロジェクト&スペック プロフェッショナル（正会員）

て24-8-20BBとした。コンクリートの出荷工場は骨材に石灰石を使用しているA工場と石灰石を使用していないT工場の2工場を選定した。また、ワーカビリティ向上対策の一つとして標準期のみフライアッシュ（FA）配合を追加した。FA配合は、24-8-20BB（T工場、石灰石以外）の配合と同じW=160kg/m³で一定とした2種類で、FA内割配合では、FAを結合材扱いとして水粉体比(W/B)をベース配合のW/Cと同じ54.5%とし、FA外割配合では、FAを細骨材補充混和材として扱い、s/aはベース配合と同じとした。

2.2 実験要因

実験は、コンクリートの打込み時期を夏期（7月）、

標準期（10月）、冬期（1月）の3シーズンで実施し、各シーズンでコンクリートの配合、出荷工場、脱型時期、養生方法、試験材齢を実験要因とした。養生方法は、20℃水中の標準養生、建築の現場での管理として実際に行われている現場水中（材齢28日）・現場封緘（材齢91日）に加え、35℃水中、5℃水中、35℃封緘、20℃封緘、5℃封緘とした。これらの要因の組み合わせを表-3に示す。

2.3 実験方法

コンクリートの受入検査はJIS A 5308に準拠し、荷卸し時にスランプ(JIS A 1101)、空気量(JIS A 1128)の各試験を行った。さらに、高精度エアメーターを用いて単位水量測定を行い、国土交通省制定の管理値である配合設

表-2 示方配合

配合No.	配合名	出荷工場	骨材種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)										AE減水剤
						W	C	FA	S				G			
									砕砂(石灰石)	海砂①	海砂②	海砂③	砕石2005(石灰石)	砕石1505	砕石2010	
1	30-18-20N	A	石灰石	50.0	47.0	175	350	-	580	249	-	-	958	-	-	1.92
2		T	石灰石以外	47.8	46.3	182	381	-	-	-	390	387	-	455	455	4.57
3	24-8-20BB	A	石灰石	55.0	46.5	148	269	-	617	265	-	-	1040	-	-	1.48
4		T	石灰石以外	54.5	44.3	160	294	-	-	-	400	394	-	507	504	3.53
5 [*]	24-8-20BB FA内割10%	T	石灰石以外	54.5	44.3	160	265	29	-	-	397	394	-	503	503	3.53
6 [*]	24-8-20BB FA外割10%	T	石灰石以外	54.5	44.3	160	294	29	-	-	382	379	-	505	505	3.53

注) ※：配合No.5,6のフライアッシュ（FA）配合は標準期のみ、その他の配合は全期で同一配合、No.6のs/aはFAを細骨材として計算

表-3 実験要因の組合せ

配合名	骨材種類	脱型時期	圧縮強度				
			養生方法	7日	28日	56日	91日
30-18-20N	石灰石以外 石灰石	1日	20℃水中	○	○		
		2日		○	●		●
		3日		○	○		
		2日	水中（現場、35℃、5℃） ^{※2}		○		
		2日	現場封緘				○
		2日	封緘（35℃、20℃、5℃） ^{※3}		●	○	●
24-8-20BB	石灰石以外 石灰石	1日	20℃水中	○	○		
		2日		○	●		●
		3日		○	○		
		2日	水中（現場、35℃、5℃） ^{※2}		○		
		2日	現場封緘				○
		2日	封緘（35℃、20℃、5℃） ^{※3}		●	○	●
24-8-20BB ^{※1} FA（内割10%） FA（外割10%）	石灰石以外	1日	20℃水中	○	○		
		2日		○	●		●
		3日		○	○		
		2日	現場水中		○		
		2日	現場封緘				○
		2日	20℃封緘		●	○	●

注) ●：細孔径分布測定、

※1：フライアッシュ（FA）配合は標準期のみ試験を実施

24-8-20BBをベースにC×10%（質量）をセメントの内割と外割で用いる2配合

※2、※3：夏期:35℃、標準期:20℃、冬期:5℃

表-4 フレッシュコンクリートの試験結果

打込み時期	配合名	出荷工場	スランブの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	単位水量の範囲 (kg/m ³)	フレッシュコンクリートの試験結果				
						スランブ (cm)	空気量 (%)	単位水量 (kg/m ³)	練上り温度 (°C)	気温 (°C)
夏期	30-18-20N	A	18±2.5	4.5±1.5	175±15	18.5	5.2	169.0	31.9	31.7
		T			182±15	20.5	4.6	182.7	32.0	32.2
	24-8-20BB	A	8±2.5	4.5±1.5	148±15	10.0	4.6	145.5	30.9	34.2
		T			160±15	7.5	3.7	169.8	31.7	32.0
標準期	30-18-20N	A	18±2.5	4.5±1.5	175±15	19.0	4.7	175.8	19.1	15.6
		T			182±15	17.0	5.9	179.1	21.4	15.6
	24-8-20BB	A	8±2.5	4.5±1.5	148±15	10.5	4.9	150.1	20.4	18.6
		T			160±15	9.5	5.0	164.2	20.8	18.9
	24-8-20BB FA内割10%	T	8±2.5	4.5±1.5	160±15	11.5	6.0	159.2	20.5	18.5
	24-8-20BB FA外割10%	T	8±2.5	4.5±1.5	160±15	9.0	4.6	155.9	20.9	18.0
冬期	30-18-20N	A	18±2.5	4.5±1.5	175±15	18.5	5.6	167.8	10.9	5.8
		T			182±15	18.5	5.6	189.0	8.6	3.8
	24-8-20BB	A	8±2.5	4.5±1.5	148±15	7.5	5.1	140.5	10.6	7.9
		T			160±15	8.0	4.2	166.2	8.9	6.1

計±15kg/m³として検査した。また、脱型までは供試体上面に合板を被せて現場気中で養生し、現場養生以外の養生温度は全て設定値±2°Cとした。封緘養生は脱型後の供試体にラップフィルムを巻き布製ガムテープで留めて密封する方法により行った。所定の材齢まで各種養生を実施した後、コンクリートの圧縮強度試験(JIS A 1108)を実施した。また、積算温度はデータロガーで測定した30分毎の養生温度より算出した。細孔径分布は水銀圧入式ポロシメーターを用いて測定した。

3. 結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートの試験結果

フレッシュコンクリートの試験結果を打込み時期毎に表-4に示す。FA内割配合のスランブ値を除いて、荷卸時に実施したスランブ、空気量、単位水量の各測定項目は、全て受入範囲内にあることがわかる。

3.2 脱型時期の違いが圧縮強度に及ぼす影響

脱型時期と1日脱型時の標準養生圧縮強度に対する強度比(1日脱型に対する圧縮強度比)の関係を配合30-18-20N、24-8-20BBについて材齢毎に図-1から図-4に示す。脱型時期が遅くなるに伴い、材齢7日、28日ともに圧縮強度は低下する傾向にある。この傾向は、夏期の24-8-20BBにおいて顕著であり、A工場では材齢28日で3日脱型の強度は1日脱型時の82.3%まで低下した。強度発現は打設翌日以降のできるだけ早期に脱型し、20°C水中養生した方が良好となることがわかった。

3.3 養生方法の違いが圧縮強度に及ぼす影響

養生の違いによる圧縮強度の変化を代表例として配合30-18-20N(T工場)について材齢毎に図-5、図-6に示す。水中養生では、全シーズンで材齢の経過に伴い圧

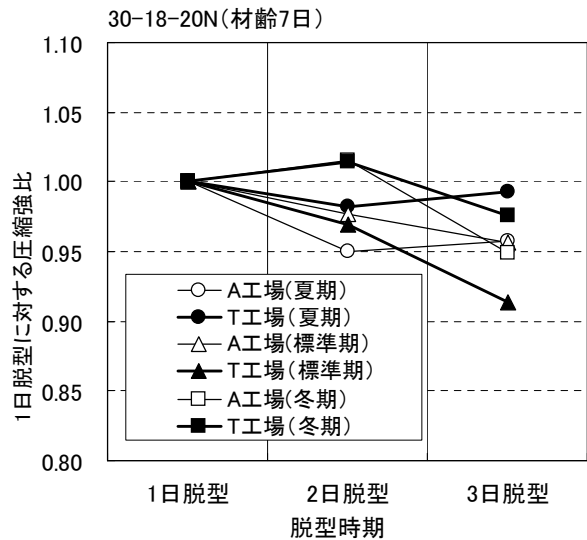


図-1 脱型時期と圧縮強度の関係(30-18-20N, 7日)

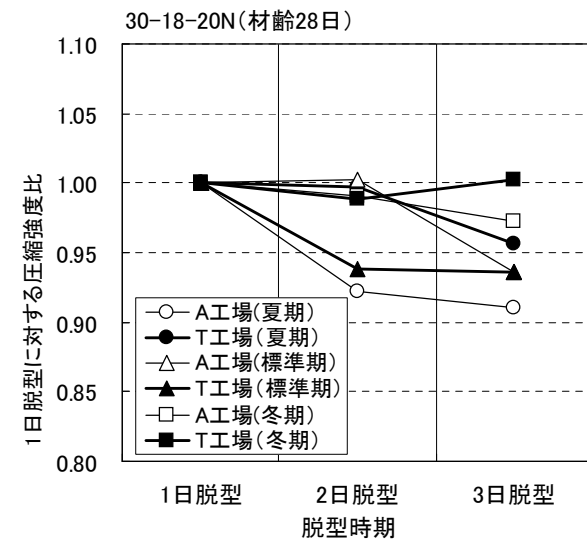


図-2 脱型時期と圧縮強度の関係(30-18-20N, 28日)

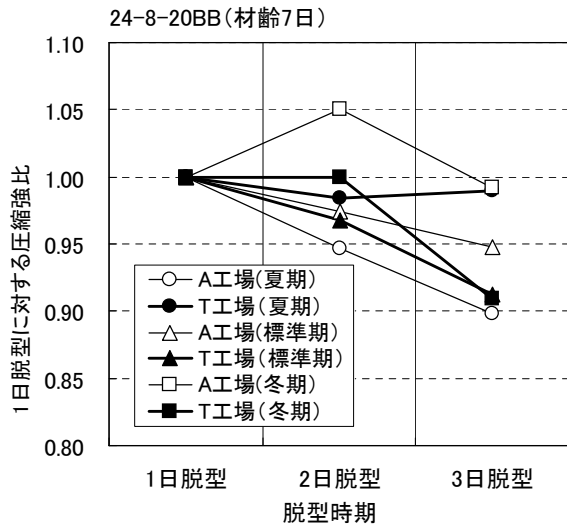


図-3 脱型時期と圧縮強度の関係(24-8-20BB, 7日)

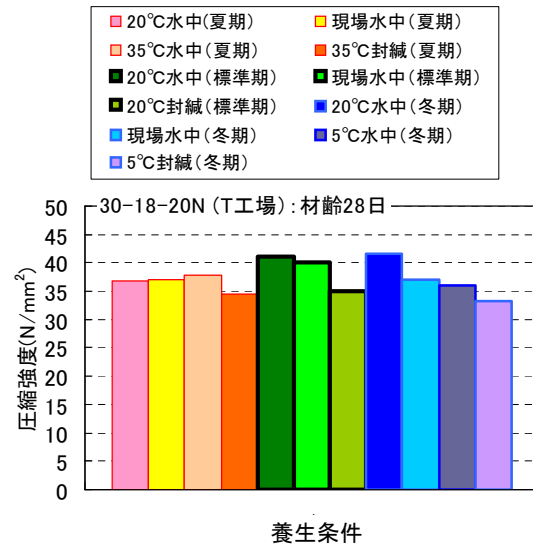


図-5 養生条件と圧縮強度の関係(30-18-20N, 28日)

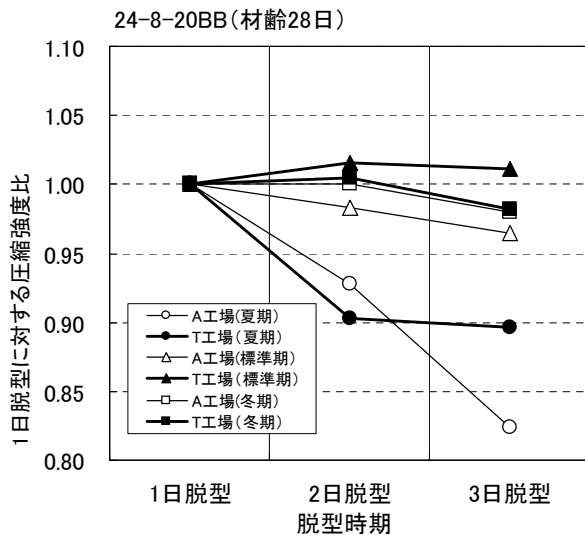


図-4 脱型時期と圧縮強度の関係(24-8-20BB, 28日)

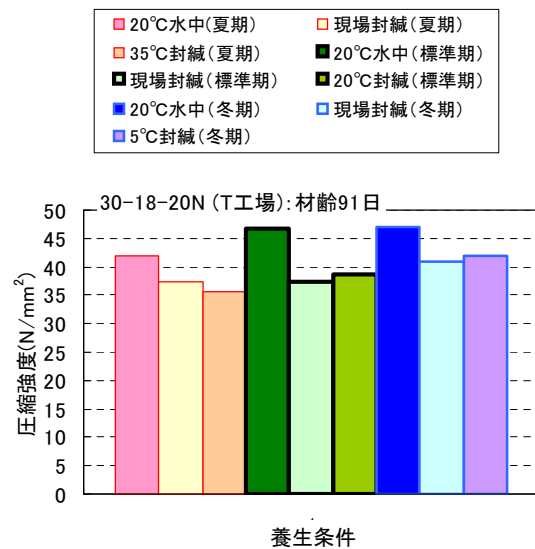


図-6 養生条件と圧縮強度の関係(30-18-20N, 91日)

縮強度は増進しているが、練上り温度が高かった夏期では圧縮強度は小さかった¹⁾。現場封緘養生(材齢91日)、35°C・20°C・5°C封緘(材齢28日、91日)では、全シーズンで20°C水中養生に比べて圧縮強度は小さくなり、材齢の経過に伴う強度増進は、冬期では20°C水中養生と同様の伸びを示すが、夏期および標準期では材齢28日から91日でほとんど強度増進が認められなかった。また、20°C水中養生強度と比較して、現場水中養生、5°C水中養生、35°C水中養生の各強度が異なるのは、同一材齢における養生温度と養生日数の積で表される積算温度の違いによるものである。これらの傾向は、セメントおよび骨材の種類が異なっても同様であった。

3.4 積算温度と圧縮強度の関係

20°C水中養生の圧縮強度(f'_c)と積算温度 M の対数値($\log M$)の近似式を他の養生の実験値とあわせて配合・

季節毎に図-7に示す。なお、夏期、標準期、冬期で配合は同じであるが、脱型までの養生温度の違いが20°C水中養生強度に影響を及ぼし、夏期では強度が小さくなったことから、季節毎に整理することとした。また、積算温度は-10°Cを基準温度とする以下の式で算出した。

$$M(t) = \sum_0^t (T + 10)$$

ここに、 $M(t)$: 材齢 t 日までの積算温度 ($D \cdot D$)

T : 養生温度

20°C水中養生の f'_c - $\log M$ 関係には高い相関が認められた。現場水中養生と35°C水中養生の実験値は、20°C水中養生の f'_c - $\log M$ 近似式の近くにプロットされるが²⁾、現場封緘養生と35°C封緘養生は下方に位置している。よっ

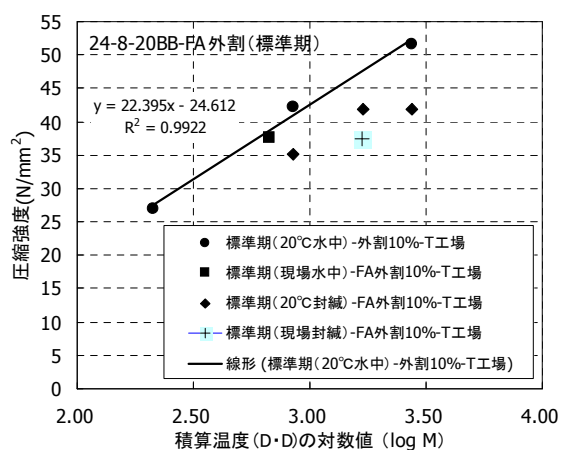
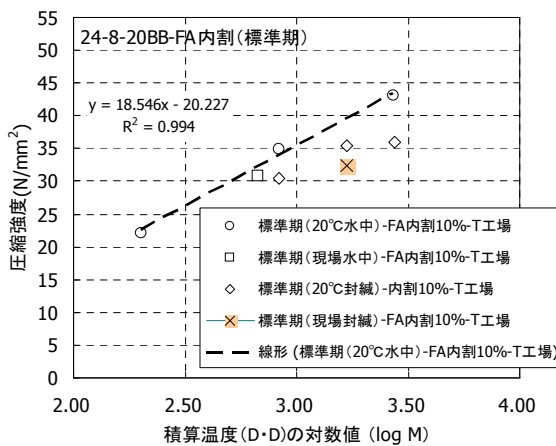
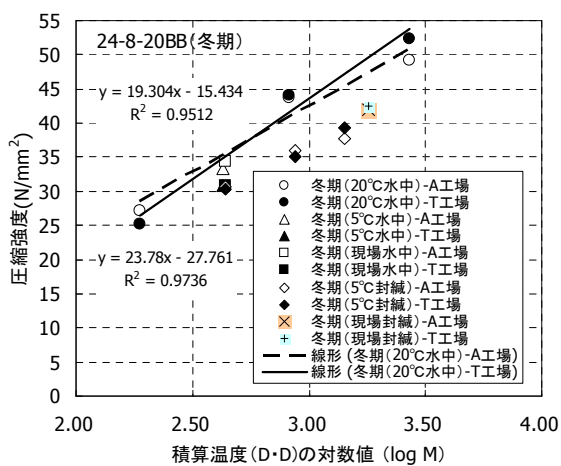
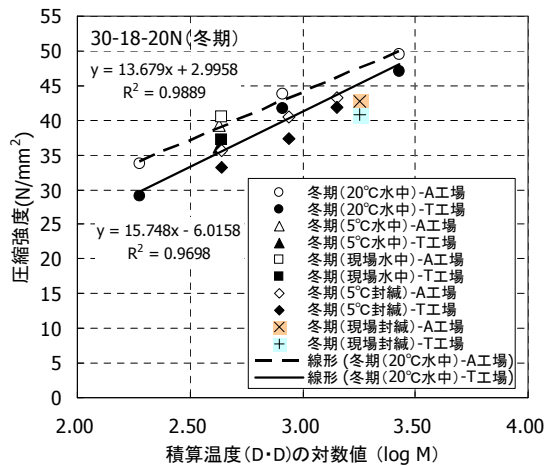
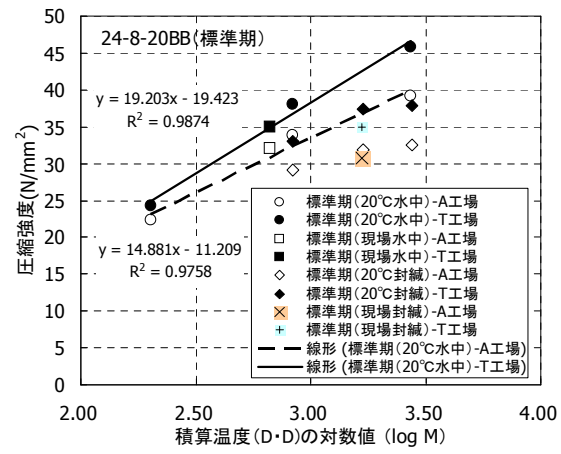
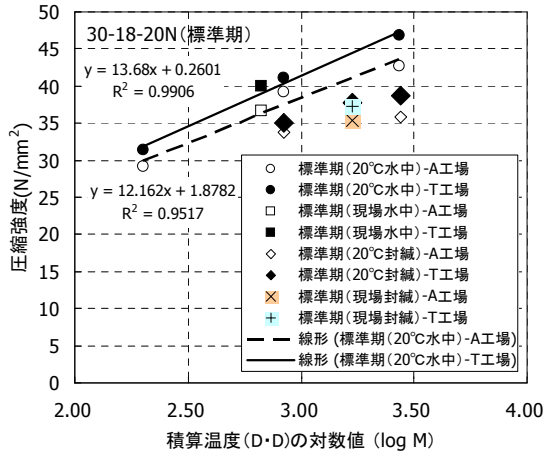
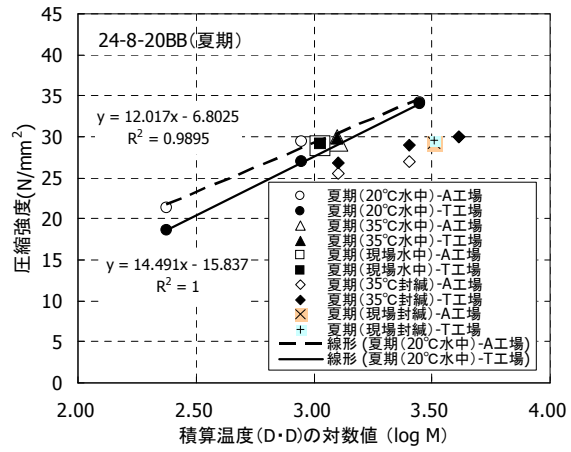
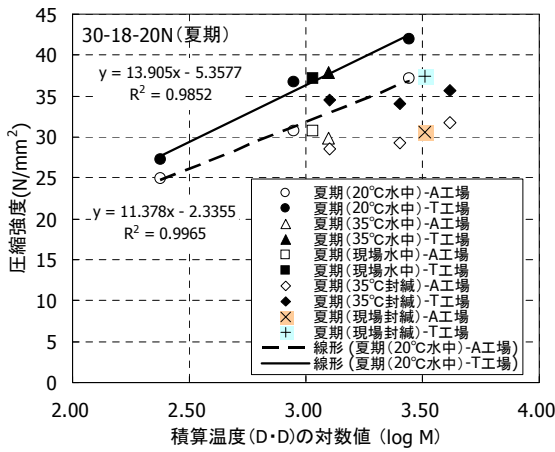


図-7 圧縮強度と積算温度の関係

て、封緘養生の圧縮強度を推定するには、若材齢を含めた封緘養生強度のデータをさらに蓄積し、封緘養生の $f'c$ と $\log M$ の近似式を別途作成し、検討する必要がある。

3.5 養生の違いが細孔径分布と圧縮強度に及ぼす影響

細孔径分布の測定結果（標準期）の代表例として

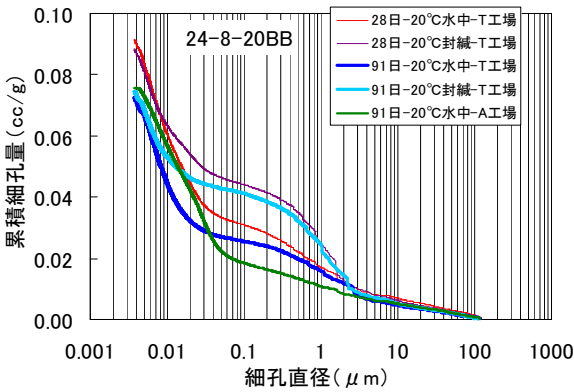


図-8 累積細孔量と細孔径の関係(24-8-20BB)

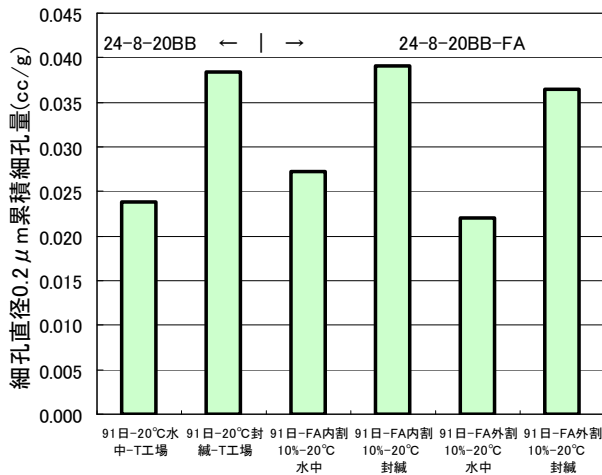


図-9 細孔径0.2 μm累積細孔量と養生条件の関係

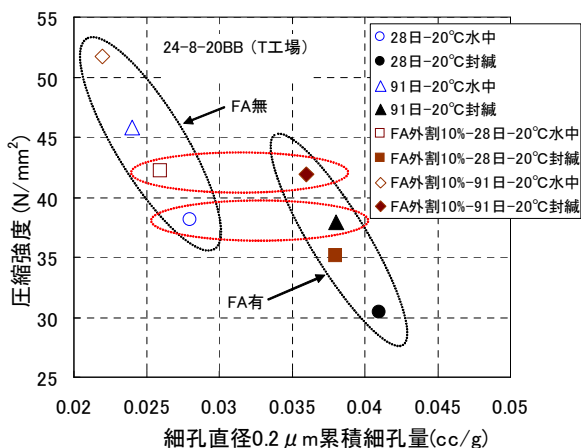


図-10 細孔径0.2 μm累積細孔量と圧縮強度の関係

24-8-20BBの累積細孔量と細孔径の関係を図-8に、細孔径 $0.2 \mu m$ 累積細孔量(以下、 $0.2 \mu m$ 細孔量)と養生条件の関係を図-9に示す。20°C水中養生と20°C封緘養生では、細孔径 $0.1 \mu m \sim 1 \mu m$ 間の累積細孔量、例えば、 $0.2 \mu m$ 細孔量は、封緘養生よりも水中養生の方が、材齢28日より材齢91日の方が、B工場より石灰石骨材のA工場の方が、FA配合では内割配合よりも外割配合の方が少なかった。 $0.2 \mu m$ 細孔量と圧縮強度の関係の代表例として24-8-20BBおよびFA配合について図-10に示す。配合毎にみると、 $0.2 \mu m$ 細孔量が少ないほど圧縮強度は大きくなっている。しかし、別配合で同程度の圧縮強度の供試体の $0.2 \mu m$ 細孔量は異なり、この細孔量により圧縮強度が一義的には決まらないといえる。

4. まとめ

本研究より得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 20°C水中養生の圧縮強度は脱型時期が遅くなるに伴い低下傾向にあり、この傾向は打込み時期が夏期、高炉セメントB種で顕著となり、材齢28日で3日脱型の強度は1日脱型の82.3%まで低下する。
- (2) 封緘養生の圧縮強度は20°C水中養生の強度よりも小さくなり、夏期および標準期で材齢の経過に伴う強度増進はほとんど認められない。
- (3) 20°C水中養生の圧縮強度と積算温度の対数値の間には高い相関が認められる。水中養生であれば養生温度が異なっても積算温度がわかれば、20°C水中養生の圧縮強度と積算温度の対数値の近似式から圧縮強度を推定できる。封緘養生の圧縮強度は封緘養生のデータから別途検討する必要がある。
- (4) 硬化コンクリートの細孔径分布は、20°C水中養生と20°C封緘養生では、細孔径 $0.1 \mu m \sim 1 \mu m$ 間の累積細孔量が明らかに異なるが、この細孔量で圧縮強度が一義的には決まらない。

参考文献

- 1) 關 裕司, 三本 巖, 女屋英明, 齊藤丈士: 打込みから養生までの温度の違いが硬化コンクリートの品質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.527-532, 2010.7
- 2) 谷口 円, 桂 修, 松村 宇, 吉野利幸: 各種セメントを使用したコンクリートの圧縮強度増進性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.357-362, 2008.7

謝辞

本研究はJCI四国支部「コンクリートの強度に及ぼす養生条件に関する研究員委員会」の成果である。