

RC 超高層建物用コンクリートに関する研究 (その4)

——若材令時における高強度コンクリートの性状——

一 瀬 賢 一 中 根 淳
久保田 昌 吾

Experimental Study on High-Strength Concrete for High-Rise Reinforced Concrete Building (Part 4)

——Properties of High-Strength Concrete at Early Age——

Ken-ichi Ichise Sunao Nakane
Shogo Kubota

Abstract

This report describes the results of tests of workability, setting time, and strength development at early age of high-strength concrete (specified design strength 600–800 kgf/cm²), to confirm its applicability to the slip-form construction method. As a result, the following were disclosed:

- ① Slump changes of high-strength concrete during transportation were within allowable limits for the slip-form construction method.
- ② It was found that high-strength concrete can be used for the slip-form construction method with suitable mix proportions and curing conditions.
- ③ The hour-degree method can be useful in estimating and controlling compressive strength development of high-strength concrete at early age.

概 要

本報は、高強度コンクリート ($F_c=600\sim 800\text{ kgf/cm}^2$) をスリップフォーム工法に適用する際問題となるコンクリートの若材令時におけるスランプの経時変化、凝結性状および強度発現性状について実験的に検討を加えたものである。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 高強度コンクリートのスランプの経時変化は、スリップフォーム工法に使用可能な範囲にあった。
- ② 適切な調査を選択し、積算温度を確保することにより、スリップフォーム工法へ高強度コンクリートの採用が可能となる目安を得た。
- ③ 積算温度方式を用いて、若材令における圧縮強度の推定・管理が可能である。

1. はじめに

カナダのCNタワー(530 m)は、現在のところ世界で一番高いコンクリート構造物である。

我が国においても、500 mを超える超高層タワーの構想が数例発表されており、近い将来には実現するものと想像される。現状の技術において、このような超高層タワーを短期間で能率的に施工するには、スリップフォーム工法が推奨される。また、この場合タワー低層部において設計基準強度が600 kgf/cm²を超える高強度コンクリートの採用も必要不可欠となろう。しかし、このような高強度コンクリートは、高性能減水剤や流動化剤など混和剤を多量に使用する場合が多く、普通強度のコンクリートに比べ凝結時間が遅延する傾向がある。またスリップフォーム工法では、打込み後数時間において脱型に十分な強度が要求されるため、上記のような高強度コンクリートを使用した場合、若材令時において十分満足

できる強度を得ることができかどうか懸念される。

本報は、スリップフォーム工法への適用性を念頭に置き、設計基準強度(以下 F_c と略す)600~800kgf/cm²のコンクリートを対象として、そのスランプの経時変化および若材令時における凝結性状、強度発現性状について実験的に検討したものである。

2. 実験概要

実験要因の組合せは、表-1に示すようにセメントの種類(普通セメント・早強セメント)、水結合材比(25%・30%)、シリカフェーム混入率(セメントの内割0%・10%)、初期養生温度(打設直後から材令1日までの雰囲気温度10°C・20°C・30°C)とした。

調査項目として、表-2に示すように練り上がり後1時間までのスランプの経時変化、プロクター貫入抵抗による凝結試験、若材令圧縮強度、圧縮強度などを主眼に選定した。

表-1 実験の組合せ

No	セメントの種類		シリカフェウム混入率		水結合材比		初期養生温度		
	普通	早強	0%	10%	25%	30%	10℃	20℃	30℃
1	○		○		○		○		
2	○		○		○			○	
3	○		○		○				○
4	○		○			○	○		
5	○		○			○		○	
6	○		○			○			○
7	○			○	○		○		
8	○			○	○			○	
9	○			○	○				○
10	○			○		○	○		
11	○			○		○		○	
12	○			○		○			○
13		○	○				○		
14		○	○					○	
15		○	○						○
16		○	○			○	○		
17		○	○					○	
18		○	○				○		○
19		○	○				○		
20		○	○					○	
21		○	○						○
22		○	○				○		
23		○	○					○	
24		○	○						○

表-2 調査項目

試験項目	摘要	測定頻度および材令
フレッシュコンクリートの性質	スランプ・空気量・コンクリート温度	1回
スランプの経時変化	混練後可変速度式傾筒型ミキサでアジテート実施。30分後、60分後測定	2回
凝結試験	ASTM C 403による 4,000psiまで測定	1回/30分
若材令圧縮強度試験	混練後3~14時間 (10Φ×20cm)	4~6材令
圧縮強度試験	材令1日・7日・28日	3材令

表-3 コンクリートの割合

No	セメントの種類	W/(C+SF)	重 量 (kg/m ³)				
			水	セメント	シリカフェウム	細骨材	粗骨材
1~3	普	25	150	600	0	587	1,103
4~6		30	170	567	0	579	1,087
7~9		25	150	540	60	579	1,090
10~12	通	30	170	510	57	571	1,073
13~15		25	150	600	0	587	1,100
16~18	早	30	170	567	0	592	1,068
19~21		25	150	540	60	579	1,087
22~24	強	30	170	510	57	587	1,054

表-4 フレッシュコンクリートの性質

No	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)	No	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)
1	23.7	1.6	18.2	13	25.2	1.7	17.0
2	25.0	2.0	22.0	14	25.5	2.6	22.3
3	26.0	1.2	29.0	15	25.5	1.3	29.5
4	24.5	1.1	17.0	16	25.0	0.9	16.0
5	25.5	1.2	19.5	17	26.0	1.2	19.8
6	26.0	1.1	29.0	18	26.5	0.9	28.0
7	24.5	1.5	20.3	19	24.5	1.5	16.5
8	25.5	6.7	20.5	20	25.0	1.9	22.8
9	26.0	1.1	28.5	21	25.2	1.5	29.5
10	25.5	1.2	18.5	22	24.8	1.9	15.5
11	17.0	1.3	18.3	23	24.0	1.3	19.7
12	25.5	1.5	28.0	24	26.0	1.1	28.7

コンクリートの混練りおよび試験は、各初期養生温度のもとで実施した。なお、圧縮強度用試験体は、材令1日まで各初期養生温度のもとで養生を行ない、その後標準水中養生 (20℃±1℃) とした。若材令圧縮強度試験は、試験体を各試験開始材令の約30分前に焼石こうでキャッピングを行ない、若材令圧縮強度試験機を用いて行った。

コンクリートの割合を表-3に示す。目標スランプを23~26 cm、目標空気量を2%以下として割合計画した。一般にスリップフォーム工法では、硬練りコンクリートが望ましいとされている。しかし Fc=600 kgf/cm² を超えるようなコンクリートの場合、施工性を長く持続させるには、上記に示すスランプの確保が必要である。

使用した材料は、粗骨材として青梅産碎石、細骨材として木更津産丘砂、混和材料としてアイスランド産 (顆粒状、比重:2.2) のシリカフェウム (以下SFと略す) を用いた。混和剤は、3種類の高性能 AE 減水剤の中から予備実験に基づき最も減水率が高く、少量の添加量で目標とするワーカビリティを確保できたポリカルボン酸エーテル系複合物のものを使用した。高性能 AE 減水剤の添加量は、割合によって異なり、結合材 (セメント+SF) の重量比1.4~3.6%の範囲で調整した。

3. 実験結果および考察

3.1 スランプの経時変化

各割合のコンクリートは、表-4に示すように一部目標スランプ、目標空気量を外れているが、ほぼ所定の品質を有するコンクリートを得ることができた。

雰囲気温度20℃のもとで実施したスランプの経時変化の例を図-1に示す。スランプの低下は、SFを混入した場合が混入しない場合に比べ大きい。しかし、全割合において、練り上がりから約1時間経過した後でも19 cm

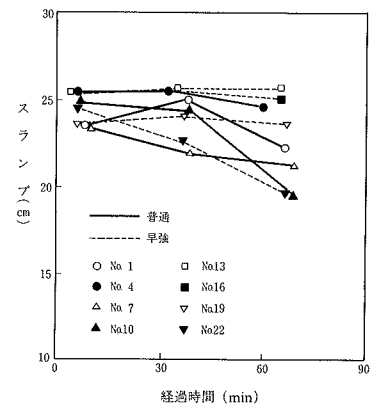


図-1 スランプの経時変化 (20℃の場合)

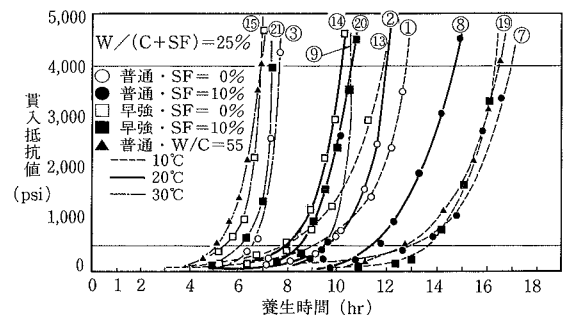


図-2 凝結試験結果 (水結合材比25%)

以上のスランプを確保しており、施工と運搬に要する時間を約1時間と想定しても十分打設可能なコンクリートであることを確認した。この結果から、練り上がり時のスランプを23~26 cm にすることにより、 $F_c=600\sim 800$ kgf/cm² の高強度コンクリートをスリップフォーム工法に適用できる可能性があると考えられる。

3.2 凝結性状

凝結試験の結果を図-2, 3に示す。水結合材比の違いによる影響はほとんど認められなく、普通強度 (W/C=55%) の凝結性状とほとんど差が無いものとみなせる。凝結性状に最も影響を与える要因は、初期養生温度である。始発時間を比較すると、10°Cで8~14時間後、20°Cで6.5~11.5時間後、30°Cで5.5~9.5時間後となり養生温度の高いものほど早期に始まっている。また始発から終結までの時間は、10°Cの4時間に対し、30°Cでは1~1.5時間と養生温度の高いほうがかなり短い。

その他の要因の影響としては、早強セメントが普通セメントよりも凝結時間が早い傾向を示す。

またSFを混入しない場合が混入した場合よりも始発・終結共に早い傾向を示す。しかし、SFを混入した場合は、目標スランプを得るため高性能AE減水剤の添加量が多くなっており、SFの有無によるものか、高性能AE減水剤の添加量によるものか断定できない。

3.3 若材令圧縮強度性状

各養生温度ごとの養生時間と若材令圧縮強度の関係を図-4~6に示す。この結果から養生温度が高いものほど強度発現が早く認められ、その後の強度増進も大きいことが分かる。養生温度10°Cでは練り上がり後6時間、20°Cでは4~5時間、30°Cでは4時間程度でスリップフォーム工法の脱型に最低必要とされる0.5 kgf/cm²以上の強度を確保できているが、これは普通強度のコンクリートの場合とほとんど遜色無いものと考えられる。

しかし、調合 No. 8のように空気量が多い場合は、強度発現がかなり遅くなる傾向があるので注意する必要がある。

図-7は、積算温度の考え方をを用い、水結合材比と若材令圧縮強度の関係を調べたものである。積算温度は、次式によって求めた。

$$\text{積算温度 (}^\circ\text{C} \cdot \text{H)} = \sum_{n=1}^n (\text{Th} + 10)$$

Th : コンクリートの各時間内における平均養生温度

n : 養生時間

この結果から、積算温度で整理した場合、両者の相関性が高く、積算温度の対数値に比例して圧縮強度が増加する。その増加傾向は、水結合材比25%, 30%においてほぼ同程度であった。このため、他の要因と若材令圧縮強度の関係についても積算温度で比較を行なった。

図-8は、初期養生温度と若材令圧縮強度の関係を示したものである。この結果から、養生温度についても若材令時の圧縮強度の増加傾向がほぼ等しくなるため、積

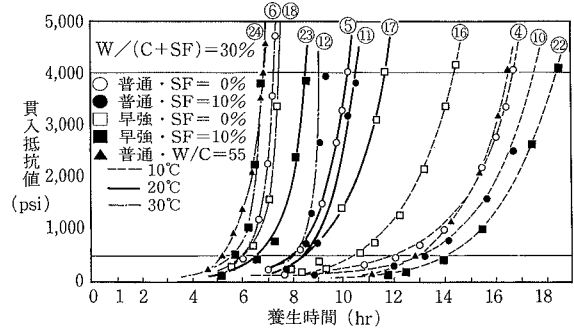


図-3 凝結試験結果 (水結合材比30%)

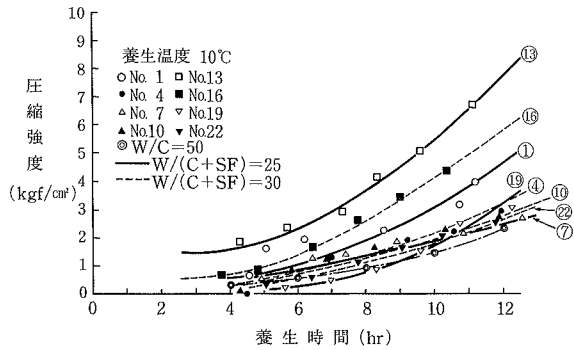


図-4 養生時間と若材令圧縮強度 (養生温度10°C)

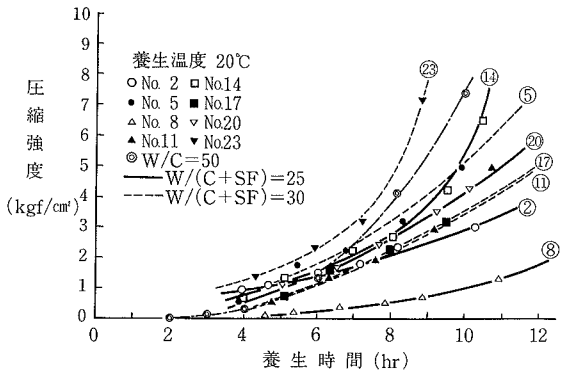


図-5 養生時間と若材令圧縮強度 (養生温度20°C)

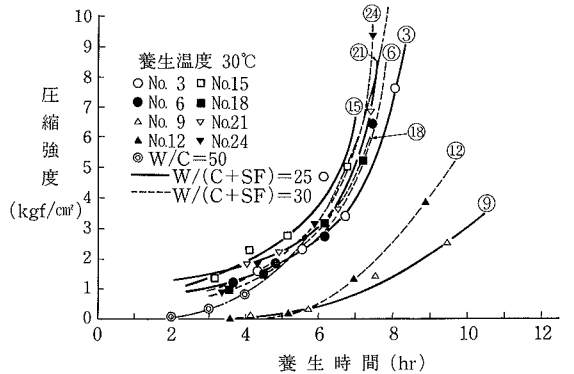


図-6 養生時間と若材令圧縮強度 (養生温度30°C)

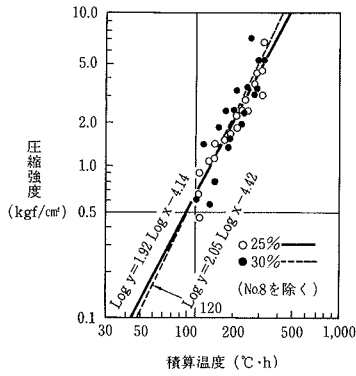


図-7 水結合材比と若材令圧縮強度

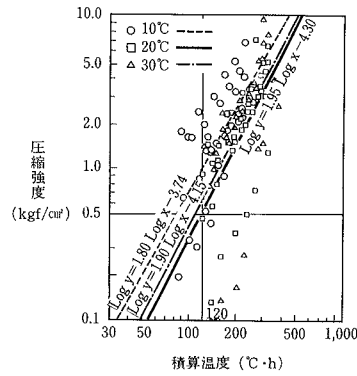


図-8 養生温度と若材令圧縮強度

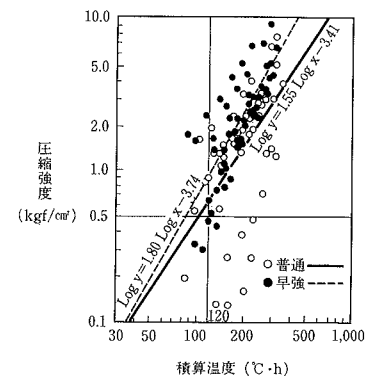


図-9 セメントの種類と若材令圧縮強度

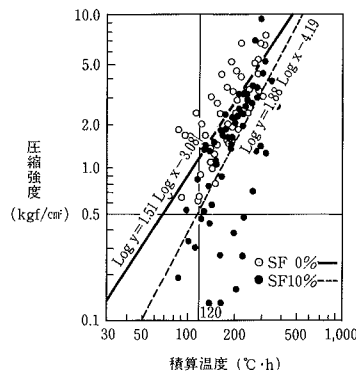


図-10 SF混入の有無と若材令圧縮強度

算温度で整理することにより養生温度の差についてもおおよそ包括できるといえる。

図-9は、セメントの種類の影響を比較したものである。普通セメントに比べ早強セメントを用いたほうが強度発現後の増進が良い傾向を示している。

図-10は、SF混入の有無の影響を比較したものである。SFを混入した場合、凝結が遅くなることも影響して若干強度発現も遅れる傾向にあると思われる。

以上の結果から、水結合材比25%、30%ともに早強セメントを使用した場合、SFを混入しない場合、初期養生温度が高いものほど強度発現が速くなることが分かった。また、一部の組合せ(普通セメント+シリカフューム使用)を除けば積算温度120°C・h(20°C・4時間または10°C・6時間)でおおむね0.5 kgf/cm²を得ることができると言える。このことから、高強度コンクリートの若材令強度を積算温度で推定・管理が可能と考えられる。

3.4 長期圧縮強度

各調合に対する材令28日までの標準水中養生による圧縮強度試験結果を表-5に示す。材令1日では、積算温度の違いにより初期養生温度の高いものほど圧縮強度が大きい。しかし、それ以降材令7日、28日においては、その差はほとんどなくなっている。この結果から初期養生

表-5 コンクリートの性質

No.	圧縮強度 (kgf/cm ²)			No.	圧縮強度 (kgf/cm ²)		
	1日	7日	28日		1日	7日	28日
1	140	787	873	13	214	818	974
2	261	756	857	14	369	851	916
3	429	805	916	15	485	833	957
4	43	599	676	16	101	720	846
5	283	559	703	17	316	738	836
6	333	594	711	18	557	612	707
7	89	796	962	19	110	799	1,030
8	205	794	921	20	408	858	1,047
9	364	812	973	21	401	815	1,002
10	59	662	771	22	124	753	916
11	228	670	834	23	406	761	916
12	314	670	843	24	620	761	898

注) 材令1日までは、各初期養生温度。以後、標準水中養生。

温度10~30°C(1日)の影響は、その後の強度発現に影響していないと考えられる。また本実験で使用したコンクリート強度は、水結合材比25%、30%それぞれ Fc=800 kgf/cm²、600 kgf/cm²を満足したといえる。

4. まとめ

Fc=600~800 kgf/cm²の高強度コンクリートを対象として、若材令時のスランプの経時変化、凝結性状および強度発現性状を調べ、以下のことが明らかとなった。

①高強度コンクリートのスランプの経時変化は、全調合において十分スリップフォーム工法に適用できる範囲にあった。

②凝結および若材令圧縮強度は、セメントの種類の違い、シリカフュームの混入の有無、養生温度の影響を受ける。しかし、適切な調合を選定し、養生温度を確保することにより、高強度コンクリート(Fc=600~800 kgf/cm²)をスリップフォーム工法へ適用することが可能となる目安を得た。

③積算温度を用いて若材令時における圧縮強度の推定・管理が可能である。

参考文献

- 1) 一瀬賢一, 中根 淳, 久保田 昌吾: 若材令時における高強度コンクリートの性状, 第13回コンクリート工学年次講演会, (1991. 6)