

論文

[1035] 若材令時における高強度コンクリートの性状

正会員○一瀬 賢一（大林組技術研究所）

正会員 中根 淳（大林組技術研究所）

正会員 久保田昌吾（大林組技術研究所）

1. はじめに

現在、世界で最も高いコンクリート造構造物は、カナダのCNタワー（530m）である。

我が国においても、将来的には 500m を超える超高層タワーを鉄筋コンクリート造で建設するという計画が想定される。このような超高層タワーの施工に際しては、スリップフォーム工法が推奨される。この場合、タワー低層部において設計基準強度600kgf/cm²以上の高強度コンクリートの採用も必要不可欠となる。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一般的に凝結時間が遅延するという傾向がある。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るかどうか懸念される。

本論文では、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、スリップフォーム工法への適用性についての見解を示す。

2. 実験概要

実験要因は、表-1に示すようにセメントの種類（普通・早強）、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（雰囲気温度10℃・20℃・30℃）をパラメータとした。各要因の組合せを表-2に示す。

実験項目は、表-3に示すようにフレッシュコンクリートの性質、練り上がり後1時間までの経時変化、プロクター貫入抵抗による凝結試験、若材令圧縮強度（材令3時間から14時間後迄）、圧縮強度（材令1日、7日、28日）である。

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

表-1 実験要因

条 件	摘 要	水準数
セメントの種類	普通・早強	2
水結合材比	25%・30%	2
シリカフェーム混入率	0%・10%	2
初期養生温度	10℃・20℃・30℃	3

表-2 実験の組合せ

No.	セメントの種類		水結合材比		シリカフェーム混入率		初期養生温度		
	普通	早強	25%	30%	0%	10%	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		○		○		○			○

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い、その後標準水中養生(20°C±1°C)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分前に焼石膏でキャッピングを行い、図-1に示す若材令圧縮強度試験機により行った。

コンクリートの調合を表-4に示す。目標スランブを23~26cm、目標空気量を2%以下として調合計画した。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ランド産(顆粒状、比重:2.2)のシリカフェーム(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性が高く、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を使用した。高性能AE減水剤の添加量は、調合によって異なり、結合材(セメント+SF)の重量比1.4~3.6%の範囲で調整した。

表-3 実験項目

試験項目	概要	測定頻度および材令
フレッシュコンクリートの性質	スランブ・空気量・コンクリート温度	1回
スランブの経時変化	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。4000psi.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

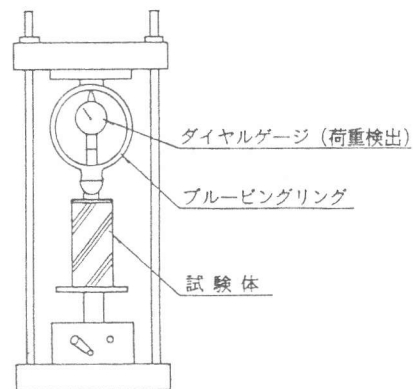


図-1 若材令圧縮強度試験機

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートの性質

フレッシュコンクリートの性質を表-5に示す。一部の結果が目標スランブ、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。

SFを混入した調合(No.8, No.9, No.10など)では、スランブが25cmを超えた場合でも良好なワーカビリティを有したが、SFを混入しない調合(No.5, No.18など)では、若干骨材分離の傾向を示した。高強度コンクリートは、高性能AE減水剤の使用により粘性が高くなるため、骨材分離が起きにくいといわれているが、多量に使用する場合は分離も生じるので注意が必要である。特に、セメント単身として使用する場合は、25cmを超えるスランブにすることは望ましくないと考えられる。また、この高強度コンクリートでは、スランブの1cmの違いがワーカビリティに大きく影響

表-4 コンクリートの調合

No.	セメントの種類	W/(C+SF)	単位容積重量 (kg/m³)				
			水	セメント	シリカフェーム	細骨材	粗骨材
1~3	普通	25	150	600	0	587	1103
4~6		30	170	567	0	579	1087
7~9		25	150	540	60	579	1090
10~12	早強	30	170	510	57	571	1073
13~15		25	150	600	0	587	1100
16~18		30	170	567	0	592	1068
19~21	高強	25	150	540	60	579	1087
22~24		30	170	510	57	587	1054

表-5 フレッシュコンクリートの性質

No.	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	No.	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
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	18.0
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	18.5
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

する。このため、スランプよりむしろフロー値で管理するほうが望ましいと思われる。今回の実験のコンクリートでは、スランプ25cmに対してフロー値60cmが対応した。

高性能AE減水剤の使用量は、所定のスランプ、フロー値を得るために、普通セメントに比べ早強セメントを使用した場合のほうが多く、セメント単身で使用する場合よりもSFを混入した場合のほうが多く必要とした。また、練り上がり温度が高いほど高性能AE減水剤の活性度が良好になる傾向があり、養生温度30℃では、今回の実験で使用した量よりも少量で十分なワーカビリチーを得られるものと思われる。

3.2 スランプの経時変化

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-2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、全調合において、練り上がりから1時間経過後でも19cm以上のスランプを確保しており、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、施工と運搬に要する時間を考慮しても練り上がり時のスランプを23~26cmにすることにより、 $F_c=600\sim 800\text{kgf/cm}^2$ の高強度コンクリートを十分スリップフォーム工法に適用することができるものと考えられる。

3.3 凝結性状

凝結試験の結果を図-3, 4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、各図に示した普通強度($W/C=55\%$)の凝結性状とほとんど差が無いものとみなせる。最も凝結性状に影響を与える要因としては、

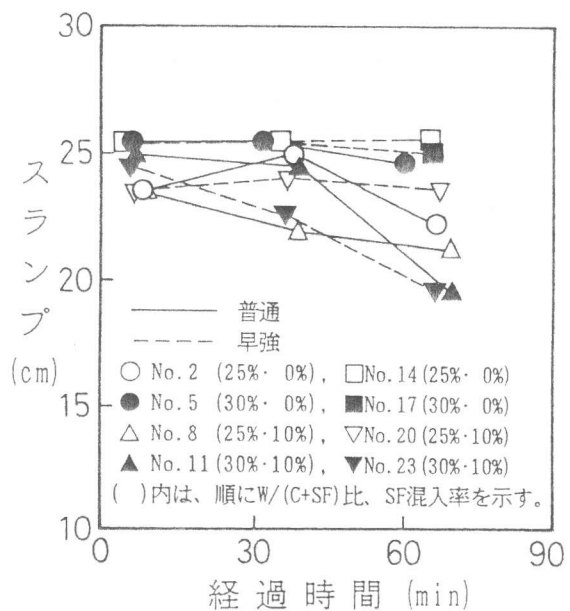


図-2 スランプの経時変化

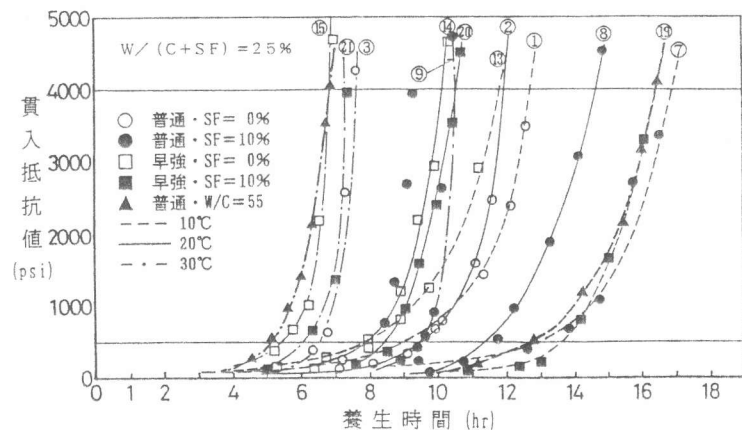


図-3 凝結試験結果 (水結合材比25%)

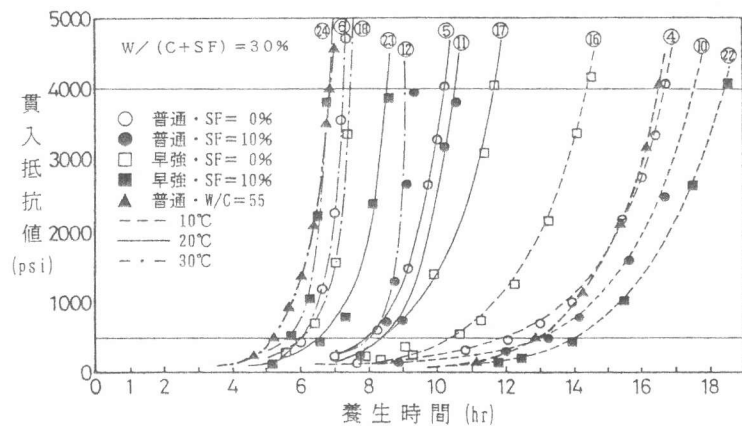


図-4 凝結試験結果 (水結合材比30%)

初期養生温度であり、始発時間を比較すると、10℃で 8~14時間後、20℃で 6.5~11.5時間後、30℃で 5.5~9.5 時間後と養生温度の高いものほど早期に始まる。また始発から終結までにかかる時間についても、10℃では4時間かかるが、30℃では 1~1.5 時間とかなり短くなる。

その他の要因の影響として、セメントに普通セメントよりも早強セメントを使用する場合の方が早い。またSF混入の有無については、混入しない場合のほうが始発・終結共に早い傾向を示す。

なお凝結性状は、高性能AE減水剤の種類および混入量によってもかなり異なるが、その傾向は類似するものと推察される。

3. 4 若材令圧縮強度性状
各養生温度別における若材令圧縮強度と養生経過時間の関係を図-5~7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速く、その後の強度増進も大きいことが分かる。一部の結果を除いて養生温度10℃では、練り上がり後6~7時間、20℃では4~5時間、30℃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0.5kgf/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やNo.9, No.12のように普通セメントにSFを混入した場合は、凝結性状同様強度発現が遅くなる傾向があるので注意する必要がある。

図-8は、積算温度の考え方を用い、水結合材比と若材令圧縮強度の関係(養生温度20℃の場合)を比較したものである。

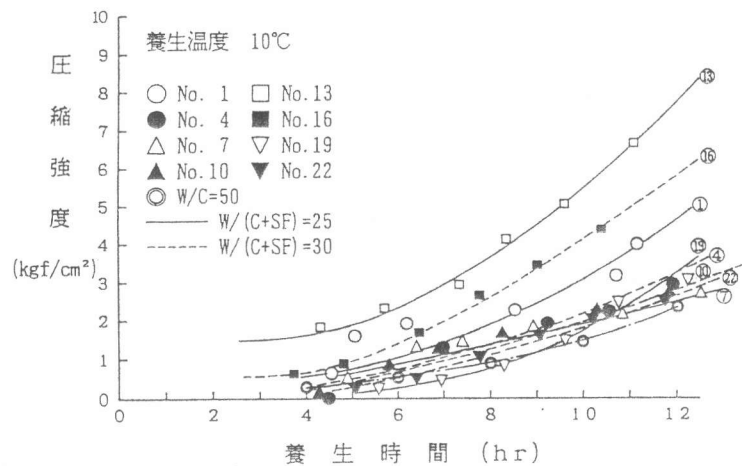


図-5 養生時間と若材令圧縮強度(養生温度10℃)

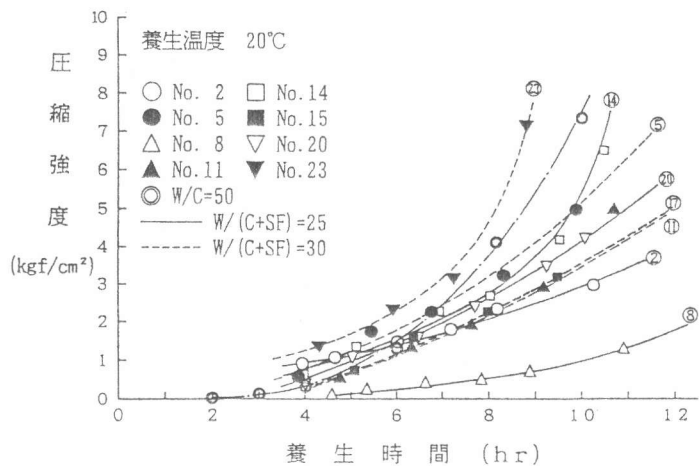


図-6 養生時間と若材令圧縮強度(養生温度20℃)

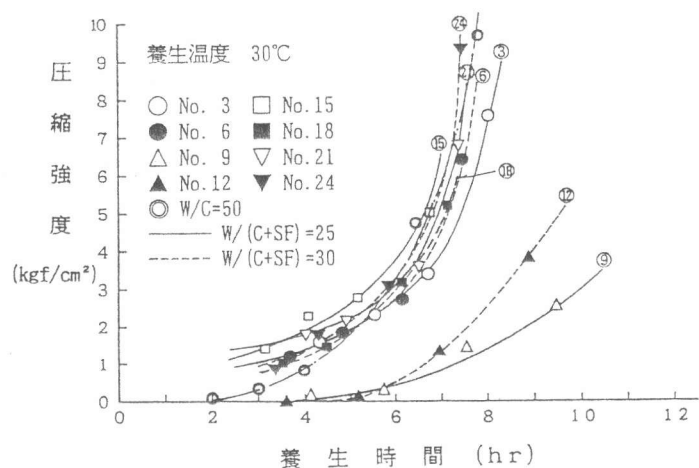


図-7 養生時間と若材令圧縮強度(養生温度30℃)

積算温度は、次式によって求めた。

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

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、両者の相関性は高く、積算温度の対数値に比例して圧縮強度が増加し、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、他の要因と若材令強度の関係についても積算温度で比較した。

図-9は、養生温度と若材令強度の関係を示す。この結果から、養生温度についても若材令時

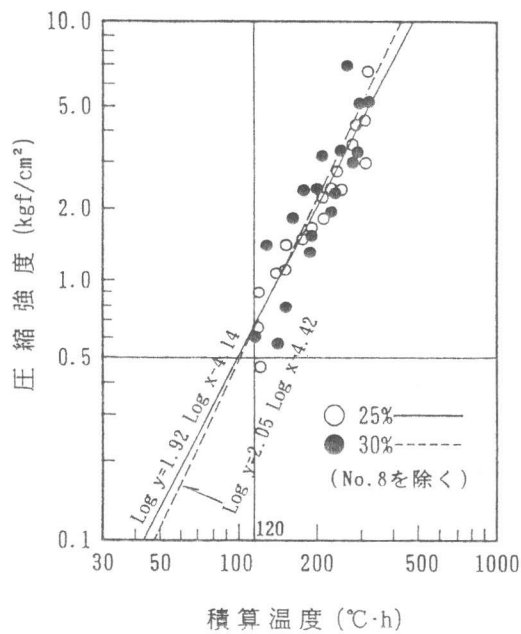


図-8 水結合材比と若材令圧縮強度

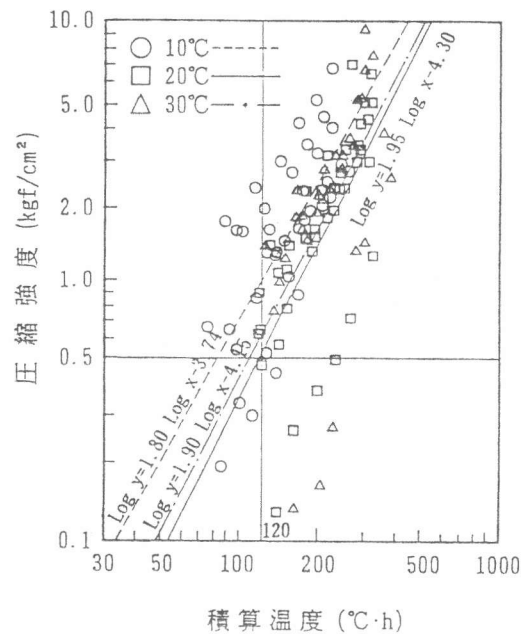


図-9 養生温度と若材令圧縮強度

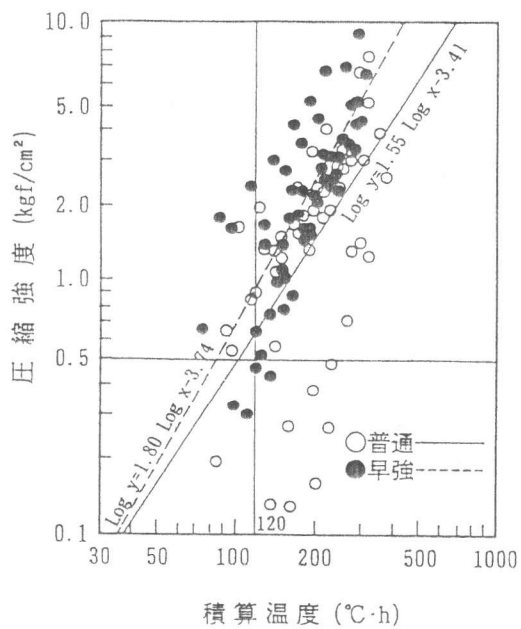


図-10 セメントの種類と若材令圧縮強度

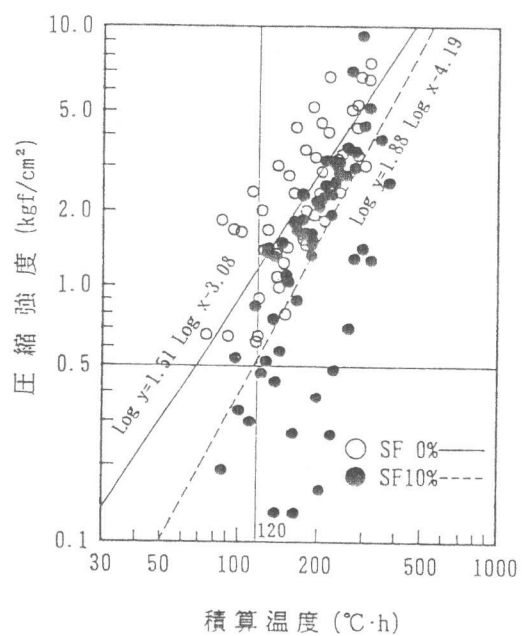


図-11 SF混入の有無と若材令圧縮強度

の圧縮強度の増加傾向がほぼ等しくなるため、積算温度で整理することにより養生温度の差を凡そ包括できるといえる。

図-10は、セメントの種類の影響を比較したものであるが、普通セメントに比べ早強セメントを用いたほうが若干強度発現後の増進が良い傾向を示している。

図-11は、SF混入の有無の影響を比較したものであるが、SFを混入した場合、凝結が遅くなることも影響して強度発現も若干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、一部の条件（普通セメント+SF使用の場合）を除けば積算温度 $120^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ ($20^{\circ}\text{C}\cdot 4$ 時間または $10^{\circ}\text{C}\cdot 6$ 時間)で概ね $0.5\text{kgf}/\text{cm}^2$ を得ることができると言える。以上のことから、積算温度方式により高強度コンクリートの若材令強度を推定・管理することが可能と考えられる。

3.5 長期圧縮強度

各調査に対する材令28日までの標準水中養生による圧縮強度試験結果を表-6に示す。材令1日では、積算温度が初期養生温度によりかなり異なるため、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温度 $10\sim 30^{\circ}\text{C}$ (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。

表-6 コンクリートの圧縮強度

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	1030
8	205	794	921	20	408	858	1047
9	364	812	973	21	401	815	1002
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、各養生温度。以後、標準水中養生。

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%でそれぞれ $F_c=800\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、 $600\text{kgf}/\text{cm}^2$ をほぼ満足したといえる。

4. まとめ

$F_c=600\sim 800\text{kgf}/\text{cm}^2$ の高強度コンクリートを対象として、その若材令時のスラブの経時変化、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ブの経時変化は、今回の実験で使用した全調査において、十分スリップフォーム工法に使用するコンクリートとして許容できる範囲にあった。
- ②凝結性状および若材令圧縮強度は、セメントの種類の違い、シリカフェュームの混入の有無、養生温度の影響を受ける。しかし、適切な調査を選定し、積算温度 ($120^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$) を確保することにより、高強度コンクリート ($F_c=600\sim 800\text{kgf}/\text{cm}^2$) 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積算温度方式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) 一瀬賢一ほか：RC超高層建物用コンクリートに関する研究（その10. 若材令時における高強度コンクリートの性状）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.633-634、1990.10